

101-60-7631

MOTC-IOT-100-H1DB004

港灣地震模擬監測及工程基本 資料庫更新之研究(1/4)



交通部運輸研究所

中華民國 101 年 4 月

101-60-7631

MOTC-IOT-100-H1DB004

港灣地震模擬監測及工程基本 資料庫更新之研究(1/4)

著 者：謝明志、賴瑞應、蘇青和、單誠基
謝幼屏、張道光、陳志芳、曾文傑
林玲煥、張文忠、紀雲曜、林炳森
陳家漢、吳珮如、黃敏郎、林文釵

交通部運輸研究所

中華民國 101 年 4 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

港灣地震模擬監測及工程基本資料庫更新之研究(1/4)

/謝明志等著.--初版.-- 臺北市：交通部運輸研究所，

民 101.04 面； 公分

ISBN 978-986-03-2249-1 (平裝)

1. 港埠工程 2.地震 3.地理資訊系統

443.2029

101006008

港灣地震模擬監測及工程基本資料庫更新之研究(1/4)

著 者：謝明志、賴瑞應、蘇青和、單誠基、謝幼屏、張道光、陳志芳、曾文傑
林玲煥、張文忠、紀雲曜、林炳森、陳家漢、吳珮如、黃敏郎、林文釁

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.ihmt.gov.tw (中文版>中心出版品)

電 話：(04)26587111

出版年月：中華民國 101 年 4 月

印 刷 者：

版(刷)次冊數：初版一刷 90 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所港灣技術研究中心網站

定 價：250 元

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組•電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號 F1•電話：(02) 25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號•電話：(04)22260330

GPN：1010100750

ISBN：978-986-03-2249-1 (平裝)

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

本著作保留所有權利，欲利用本著作全部或部分內容者，須徵求交通部運輸研究所書面授權。

GPN: 1010100750

定價 250 元

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：港灣地震模擬監測及工程基本資料庫更新之研究(1/4)			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN978-986-03-2249-1 (平裝)	政府出版品統一編號 1010100750	運輸研究所出版品編號 101-60-7631	計畫編號 100-H1DB004
本所主辦單位：港研中心 主管：邱永芳 計畫主持人：謝明志 協同主持人：賴瑞應、陳志芳、曾文傑 研究人員：蘇青和、單誠基、謝幼屏、張道光、林玲煥 技術人員：陳義松、李春榮、李昭明、何木火、陳毓清、魏瓊蓉、林隆貞、黃如蜜 聯絡電話：04-26587111 傳真號碼：04-26564418		合作研究單位：財團法人成大研究發展基金會 ；財團法人成大研究發展基金會 計畫主持人：張文忠、紀雲曜 協同主持人：林炳森 研究人員：陳家漢、吳珮如、黃敏郎、林文釵 地址：臺南市大學路1號 聯絡電話：06-2757575~63128、06-3840251	
研究期間 自 100 年 1 月 至 100 年 12 月			
關鍵詞：動態模型試驗、數值模擬、地理資訊系統、土壤液化、海氣象調查、防救災資料庫、港灣地區防救災體系			
摘要： 臺灣正位於地震發生最頻繁的環太平洋地震帶西側，每年大小地震不斷，而且臺灣重要的商港大都座落於疏鬆軟弱之沖積土層與回填之新生地上，在強烈地震作用下，極可能發生結構物震盪損傷，或因土壤液化引發港灣碼頭向海側位移、傾斜與沉陷等災害；另西南沿海部分地區，因地下水抽取補注失衡，仍有持續下陷現象，此亦影響港區的現有設施及未來發展。故此，對於港灣地區的地震下陷等地質災害，我們不可不審慎防備。 因而，本計畫在本年度內針對港灣地區，進行五大主要工作：(1)港區碼頭動態模型試驗及數值模擬研究，(2)港區各類碼頭結構物耐震能力分析，(3)港區地震及地層下陷分層監測研究，(4)港區工程基本資料庫更新建置，(5) 港區防救災網路地理資訊系統擴建及整合等研究工作，以提升現有港區受震評估技術，減少地震或下陷災害可能帶來的衝擊，提供港務單位做為規劃設計及防救災決策支援使用。 研究成果效益： 1. 學術效益，發表研討會論文 2 篇： (1) 2011 年臺灣地理資訊學會年會暨學術研討會，發表論文「整合雲端與行動裝置之災情傳遞應用初步研究」。			

(2)第 33 屆海洋工程研討會暨國科會成果發表會，發表論文「碼頭結構耐震性能設計法之性能目標研究」。

2. 社會環境安全影響：本計畫建立港灣地區防救災體系地理資訊系統，目前已建置五大港區資料系統，最終之研究成果應可提供作為港區防救災之災前預防、災時應變及災後重建計畫之參考，以提升我國之整體防災能力，有助於環境之安全與資源之永續利用。
3. 資料庫建置效益：建置港灣工程基本資料庫及建立港區防救災體系之相關資料庫，可作為港灣地區之地震災前預防、災時應變計畫與決策之參考依據。

提供應用情形：

1. 本計畫利用地理資訊系統所開發之「港灣工程基本資料查詢展示系統」，已推廣至高雄、基隆等港務局使用。
2. 所開發安平港之港區防救災系統，高雄港務局正規劃納入港務組港區防災作業中。
3. 所建置資料庫含各港圖文屬性資料，隨時可提供本所及港務單位研究分析、開發規劃之需用。

出版日期	頁數	定價	本 出 版 品 取 得 方 式
101 年 4 月	338	250	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。

機密等級：

☐密 ☐機密 ☐極機密 ☐絕對機密

(解密條件：☐ 年 ☐ 月 ☐ 日解密，☐公布後解密，☐附件抽存後解密，

☐工作完成或會議終了時解密，☐另行檢討後辦理解密)

☒普通

備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。

**PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS**

TITLE: The study of seismic simulation and monitoring and the renewal of engineering basic database in harbor areas. (1/4)			
ISBN(OR ISSN) ISBN978-986-03-2249-1 (pbk)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1010100750	IOT SERIAL NUMBER 101-60-7631	PROJECT NUMBER 100-H1DB004
DIVISION: Harbor & Marine Technology Center DIVISION DIRECTOR: Chiu Yung-Fang PRINCIPAL INVESTIGATOR: M. J. Hsieh CO-PROJECT INVESTIGATOR: R. Y. Lai, J. F. Chen, W. J. Tseng. PROJECT STAFF: C. H. Su, C. C. Shan, Y. P. Hsieh, D. K. Chang, L. F. Lin PROJECT TECHNICIAN: Y. S. Chen, C. R. Lee, Z. M. Lee, M. H. Ho, Y. Q. Chen, Q. R. Wei, X. F. Huang, L.F. Lin, J. M. Huang PHONE: (04) 26587111 FAX: (04) 26564418			PROJECT PERIOD FROM January 2011 TO December 2011
RESEARCH AGENCY: NATIONAL CHENG KUNG UNIVERSITY PRINCIPAL INVESTIGATOR: W. J. Chang, Y. Y. Chi CO-PROJECT INVESTIGATOR: P. S. Lin PROJECT STAFF: C. H. Chen, P. Z. Wu, M. L. Huang, W. F. Lin ADDRESS: No.1, University RD., Tainan City 701, Taiwan, R.O.C. PHONE: (06) 2757575~63128, (06) 3840251			
KEY WORDS: Dynamic physical modeling, Numerical simulation, Geographic information system, Harbor engineering basic data, Soil liquefaction, Oceanographic investigation data, Disaster prevention and rescue system, Disaster prevention and rescue data base.			
ABSTRACT : Taiwan is just located at the western part of the circum-Pacific seismic zone where is the highest seismic frequency area on earth, so that there are many earthquakes in every year. Besides the major harbors of Taiwan are almost located on the soft alluviums or the backfill relictions. It is possible to occur shaking damages of structures or lateral displacement, tilt and settlement of wharves by soil liquefactions under the attack of strong seismic waves. In addition, in some areas at the southwestern coast of Taiwan, land-subsidence still occurs that also affects the present facilities and future development. Facing those geologic damages, we should be careful to treat and prevent. The undergoing project will perform following works in selected harbor areas: (1) physical and numerical modeling on seismic responses of harbor supporting systems, (2) seismic performance-based assessment of wharf structures (3) in-situ seismic monitoring and stratum subsidence investigation in harbor and marine areas, (4) renewal of engineering basic database of harbors and (5) establishing disaster prevention and rescue system of network-based GIS in harbor areas, etc. Those results could raise the seismic assessment technology, reduce the damage impact of earthquake or subsidence, and offer the harbor bureaus to serve as reference for policy-making support in engineering planning, designing and disaster prevention.			

Benefits of research results:

1. Academic benefits, publication of 3 papers in conferences and academy bulletins.
 - (1)“The Study of Disaster Information Transmission Base on Cloud Computing and Mobile Devices”, 2010 Taiwan Geographic Information System Association Annual Conference.
 - (2)“The Performance Objectives Study of Performance-Based Seismic Design for Wharf Structure”, the 33rd Ocean Engineering Conference in Taiwan.
2. Impact on social and environmental safety: the result of this project can provide disaster prevention, disaster emergency management and rehabilitation after disaster.
3. The benefit of database building: It provides valuable information to facilitate the decision-making during and after disaster.

Current situation in application:

1. “Query demonstration system of harbor engineering basic database” developed by this project has been put into use in Kaohsiung Harbor and Keelung Harbor.
2. The Disaster Prevention and Rescue System in Anping Port developed by this project has been incorporating into the Disaster Rescue System of Kaohsiung Harbor.
3. The database in this project can be used at any time for further study and planning.

DATE OF PUBLICATION	NUMBER OF PAGES	PRICE	CLASSIFICATION
April 2012	338	250	☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED

The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.

港灣地震模擬監測及工程基本資料庫更新之研究(1/4)

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	III
目錄	V
圖目錄	XIII
表目錄	XXV
第一章 前言	1-1
1.1 計畫緣起	1-1
1.2 研究目標	1-2
1.3 預期效益	1-2
第二章 港區碼頭動態模型試驗	2-1
2.1 試驗簡介	2-1
2.2 極限平衡分析模型設計	2-1
2.2.1 模型假設	2-1
2.2.2 主樁受力機制假設	2-2
2.2.3 結果整理	2-5
2.2.4 板樁式碼頭模型之建立	2-12
2.3 試驗設備	2-15
2.3.1 大型雙軸向剪力試驗盒	2-15
2.3.2 大型砂土震落箱	2-18
2.3.3 量測儀器與配置	2-21

2.4 試體準備與試驗步驟	2-26
2.4.1 錨碇式板樁碼頭模型之架設	2-26
2.4.2 量測儀器之架設.....	2-27
2.4.3 砂土賡降與人工回填.....	2-28
2.4.4 地震模擬.....	2-30
2.4.5 試驗資料量測.....	2-30
2.5 試驗資料處理與呈現	2-31
2.5.1 資料分析架構.....	2-31
2.5.2 加速度計及位移計資料分析	2-31
2.5.3 水壓計資料分析.....	2-33
2.5.4 微型單向加速度計資料分析	2-34
2.5.5 Shape array 資料分析	2-38
2.5.6 應變計資料分析.....	2-43
2.5.7 模型量測與極限平衡及文獻比較	2-45
第三章 震動台模型數值模擬分析.....	3-1
3.1 數值分析原理	3-1
3.1.1 FLAC 動態分析介紹	3-1
3.1.2 分析程序.....	3-7
3.2 錨碇板樁碼頭模型有效應力動態數值分析	3-10
3.2.1 分析原理與程序.....	3-10
3.2.2 數值分析模型.....	3-12
3.2.3 板樁模型數值分析結果	3-15
第四章 耐震功能性設計要求探討.....	4-1

4.1 碼頭功能性目標	4-1
4.2 地震等級、功能性水準及重要度分類	4-3
4.2.1 地震等級	4-3
4.2.2 功能性水準	4-6
4.2.3 重要度分類	4-7
4.3 現行基準之功能性目標	4-8
4.4 國內港灣碼頭功能性目標制定之建議	4-11
4.5 現行基準與本研究建議功能性目標之差異性探討	4-14
第五章 重力式碼頭功能性規定及分析方法探討	5-1
5.1 重力式碼頭功能性可接受標準	5-1
5.2 重力式碼頭耐震功能性分析法	5-4
5.2.1 簡便分析法	5-5
5.2.2 簡便動力分析	5-7
5.2.3 動力分析法	5-10
第六章 既有重力式碼頭功能性評估探討	6-1
6.1 案例基本條件	6-1
6.2 功能目標	6-3
6.3 利用簡便分析法進行耐震功能性評估	6-5
6.3.1 Level 1(回歸期約 50 年)地震力檢核	6-5
6.3.2 Level 2(回歸期約 475 年)地震力檢核	6-15
6.3.3 Level 3(回歸期約 2500 年)地震力檢核	6-16
6.4 利用簡便動力分析法進行耐震功能性評估	6-18
6.5 利用動力分析法進行耐震功能性評估	6-20

6.6 小結	6-36
第七章 港灣地區地震監測分析	7-1
7.1 地震及動態水壓監測系統	7-1
7.2 井下地震監測分析	7-6
7.3 動態水壓監測分析	7-15
7.4 地表地震監測分析	7-25
7.4.1 傅立葉振幅譜	7-25
7.4.2 傅氏頻譜分析	7-26
7.4.3 單站頻譜比	7-33
7.4.4 反應頻譜分析	7-37
7.5 時頻分析	7-46
7.6 港灣地區地震資訊網	7-49
7.7 港區微地動試驗	7-52
7.7.1 臺北港區微地動試驗與共振主頻	7-52
7.7.2 高雄港區微地動試驗與共振主頻	7-55
第八章 港灣地區地層下陷監測分析	8-1
8.1 布袋港監測站	8-1
8.1.1 布袋港地下水位分析	8-1
8.1.2 布袋港分層地層下陷分析	8-3
8.2 大鵬灣監測站	8-15
8.2.1 地下水位分析	6-15
8.2.2 分層地層下陷分析	8-15
8.3 臺中港監測站	8-18

8.3.1 地下水位分析	8-18
8.3.2 分層沉陷分析	8-18
8.4 安平港監測站	8-21
8.4.1 地下水位分析	8-21
8.4.2 分層地層沉陷分析	8-21
第九章 港埠規劃資料更新建置及查詢操作	9-1
9.1 系統操作程序	9-1
9.2 港埠規劃資料查詢說明	9-2
9.2.1 進入查詢系統	9-2
9.2.2 港埠規劃資料查詢	9-3
第十章 港區地質資料分析建置	10-1
10.1 系統操作程序	10-1
10.2 蘇澳港地質鑽探資料及液化分析查詢說明	10-4
10.2.1 進入查詢系統	10-4
10.2.2 地質鑽探資料查詢	10-4
10.2.3 Liao 液化機率分析成果展示	10-5
10.2.4 Seed 液化分析成果展示	10-6
10.2.5 Lai(賴聖耀, 2003)本土化液化機率分析成果展示	10-11
10.2.6 Lai(賴聖耀, 2003)本土化安全係數液化分析成果展示	10-11
10.2.7 Ishihara 地震下陷分析成果展示	10-15
第十一章 貨櫃碼頭營運資料查詢展示	11-1
11.1 貨櫃碼頭營運資料更新建置概況	11-1
11.2 貨櫃碼頭營運資料配置圖層及屬性資料錄說明	11-1

11.3 貨櫃碼頭營運資料查詢展示模組設計	11-2
11.3.1 查詢選單設計規劃.....	11-2
11.3.2 查詢模組設計規劃.....	11-3
11.4 貨櫃碼頭營運資料查詢展示操作程序	11-4
11.5 高雄港貨櫃碼頭營運資料查詢展示	11-5
11.6 臺中港貨櫃碼頭營運資料查詢展示	11-6
11.7 基隆港貨櫃碼頭營運資料查詢展示	11-7
第十二章 海氣象調查資料查詢展示	12-1
12.1 海氣象調查資料查詢設計	12-1
12.2 查詢選單與檔案關聯說明	12-2
12.3 系統操作程序	12-4
12.4 高雄港海氣象調查資料查詢展示	12-5
第十三章 港區防救災資料庫系統建置與更新.....	13-1
13.1 強化 4D 展現功能	13-1
13.2 系統效能改善	13-1
13.2.1 以雲端主機改善系統效能	13-2
13.2.2 使用雲端主機之效益與風險	13-3
13.2.3 以雲端系統建構之防救災資料庫系統架構	13-4
13.3 安平港資料庫系統功能需求	13-5
13.4 安平港防救災資料庫系統架構	13-7
第十四章 既有防救災系統整合應用演練測試.....	14-1
14.1 臺中港務消防隊救災系統整合	14-1
14.1.1 臺中港務消防隊之「救災系統」之現況	14-1
14.1.2 救災車輛即時影音傳輸流程	14-3

14.2 即時災情資訊整合規劃	14-4
14.2.1 災情歷程空間資訊更新	14-5
14.2.2 整合式災情通報.....	14-6
14.2.3 動態災情影音連結.....	14-6
14.2.4 港區即時災情 Google KML 檔案	14-7
14.3 臺北港金華演習	14-8
14.3.1 金華演習參與歷程.....	14-8
14.3.2 毒化物災害應變作為一使用 ALOHA 毒化物境況模擬系統	14-9
14.3.3 多媒體災情資訊傳遞.....	14-11
14.3.4 港區 CCTV 監控	14-12
14.3.5 演習歷程說明.....	14-13
14.4 臺中港海嘯應變演練暨港口保全演習	14-14
14.4.1 臺中港海嘯應變演練暨港口保全演習歷程	14-15
14.4.2 海嘯漫淹模擬.....	14-16
14.4.3 臺中港務消防隊「救災系統」測試	14-17
14.4.4 演習歷程說明.....	14-17
第十五章 結論與建議.....	15-1
15.1 研究目的與問題	15-1
15.2 結論	15-1
15.3 建議	15-5
15.4 研究成果之效益	15-7
15.5 提供政府單位應用情形	15-7
參考文獻.....	參-1

圖 目 錄

圖 2.1	常時主樁模型之受力情形.....	2-2
圖 2.2	地震時背填土壤未液化主樁模型之受力情形.....	2-3
圖 2.3	地震時背填土壤部分液化主樁模型之受力情形.....	2-4
圖 2.4	常時計算結果.....	2-6
圖 2.5	地震時背填土未液化($Z=0.1g$)計算結果	2-7
圖 2.6	地震時背填土部分液化($Z=0.1g$)計算結果	2-8
圖 2.7	常時與地震時背填土未液化計算結果.....	2-10
圖 2.8	地震時背填土部分液化計算結果.....	2-11
圖 2.9	板樁式碼頭極限平衡法計算下配置圖	2-14
圖 2.10	雙軸向剪力試驗盒外觀.....	2-16
圖 2.11	內外複合框架配合兩組滑軌.....	2-16
圖 2.12	剪力試驗盒運動型態示意圖.....	2-17
圖 2.13	矽膠膜裝設示意圖	2-17
圖 2.14	實落箱本體裝填欲實落之越南砂.....	2-19
圖 2.15	實落箱本體與可抽換式多孔盤之孔位配置圖.....	2-19
圖 2.16	分散器--實落箱底部篩網.....	2-20
圖 2.17	以實落裝置進行試體準備	2-20
圖 2.18	剪力試驗盒外部之位移計、加速度計配置圖.....	2-22
圖 2.19	砂土試體內部與主樁量測儀器配置圖.....	2-23
圖 2.20	錨碇式板樁碼頭模型配置圖.....	2-27
圖 2.21	人工回填.....	2-29

圖 2.22 試體準備完成圖	2-29
圖 2.23 資料處理架構	2-31
圖 2.24 Event 5 剪力試驗盒整體位移歷時	2-32
圖 2.25 剪力試驗盒整體加速度歷時	2-33
圖 2.26 斷面 C 之超額孔隙水壓歷時	2-35
圖 2.27 斷面 E 之加速度歷時	2-36
圖 2.28 斷面 C 之加速度歷時	2-37
圖 2.29 Shape array 同步化	2-39
圖 2.30 Event 5 之 Shape array 與微型單向加速度計之比較	2-40
圖 2.31 Event 10 之 Shape array 與微型單向加速度計之比較	2-41
圖 2.32 Event 5 之主樁位移	2-42
圖 2.33 Event 10 之主樁位移	2-42
圖 2.34 錨碇式板樁碼頭模型破壞	2-43
圖 2.35 Event 5 之主樁剪力分布圖	2-44
圖 2.36 Event 10 之主樁剪力分布圖	2-44
圖 2.37 液化板樁側向應力分佈比較圖	2-45
圖 2.38 液化板樁彎距分佈比較圖	2-46
圖 3.1 考慮動態荷重之自由場物理模型圖	3-5
圖 3.2 錨碇式板樁數值模型	3-15
圖 3.3 錨碇式板樁靜力平衡垂直有效應力、結構彎距與錨碇力 ..	3-15
圖 3.4 監測點位與動態邊界	3-16
圖 3.5 加速度歷時變化	3-16
圖 3.6 孔隙水壓力歷時變化	3-17

圖 3.7	t=15 sec 時板樁系統位移分布圖	3-17
圖 3.8	板樁水平向頂底部相對位移歷時變化.....	3-18
圖 3.9	板樁系統與土壤變形分佈(t=15 sec).....	3-18
圖 3.10	板樁系統彎距與土壤垂直有效應力分佈(t=15 sec)	3-19
圖 3.11	板樁最大彎距歷時.....	3-20
圖 3.12	鋼索拉力歷時.....	3-20
圖 3.13	數值、文獻與模型量測之彎距分佈比較.....	3-21
圖 4.1	四港區平均地震危害度曲線.....	4-4
圖 4.2	國內現行基準的耐震功能性目標區域圖.....	4-11
圖 4.3	本研究建議的港灣碼頭耐震功能性目標區域圖.....	4-14
圖 4.4	研究建議與現行基準之港灣碼頭耐震功能性目標區域比較	4-15
圖 5.1	重力式碼頭之功能性參數.....	5-2
圖 5.2	重力式碼頭之破壞模式.....	5-4
圖 5.3	Newmark 之滑動塊體分析法的觀念	5-7
圖 5.4	重力式碼頭簡便動力分析(滑動塊體分析法)評估流程圖	5-8
圖 6.1	臺中港 1~4 號碼頭標準斷面圖.....	6-3
圖 6.2	重力式碼頭耐震功能性簡便分析法評估流程圖.....	6-6
圖 6.3	計算背填土等效單位重與等效摩擦角之示意圖.....	6-8
圖 6.4	地震時作用於結構之力量示意圖.....	6-13
圖 6.5	重力式碼頭簡便動力分析評估流程圖.....	6-18
圖 6.6	TCU059 清水國小於 921 集集地震之歷時記錄(南北向).....	6-19
圖 6.7	未考慮液化因素之碼頭滑動量分析結果.....	6-19
圖 6.8	FLAC 程式之圖形操作界面啟動畫面	6-21

圖 6.9	設定 FLAC-GIIC 的初始作業環境.....	6-21
圖 6.10	臺中港數值模擬網格圖.....	6-22
圖 6.11	設定各區材料參數.....	6-22
圖 6.12	以體積模數分佈圖檢核三區不同之土體.....	6-23
圖 6.13	設定靜態邊界條件.....	6-23
圖 6.14	設定沉箱與土體間之材料界面(Interface)參數.....	6-24
圖 6.15	進行重力力學計算達到平衡狀態.....	6-25
圖 6.16	施加海水側向靜水壓力.....	6-26
圖 6.17	指定土體中及自由面上之飽和層示意圖.....	6-26
圖 6.18	飽和面以下的土體達滲流平衡之示意圖.....	6-27
圖 6.19	靜態系統力學平衡之示意圖.....	6-27
圖 6.20	設定 FLAC 程式內建之 Finn-Martin model 參數.....	6-28
圖 6.21	加速度歷時資料積分為速度歷時資料.....	6-29
圖 6.22	臺中港數值模擬之 Rayleigh 阻尼參數設定.....	6-30
圖 6.23	自由場邊界之地震分析模型.....	6-30
圖 6.24	指定自由場邊界位置圖.....	6-31
圖 6.25	指定並設定消能邊界於柔性基底.....	6-31
圖 6.26	考慮動態荷重之自由場模型圖.....	6-32
圖 6.27	以循環周期 40 秒執行自由場動態分析.....	6-32
圖 6.28	應用 FLAC 模擬碼頭受地震引致土壤液化之流程圖.....	6-33
圖 6.29	數值模擬之碼頭受震後往海側之位移量.....	6-34
圖 6.30	數值模擬之碼頭受震後往海側之沉陷量.....	6-34
圖 6.31	數值模擬之碼頭後線地表沉陷監控點位移量.....	6-35

圖 6.32 數值模擬之圖碼頭後線地表沉陷曲線圖	6-35
圖 6.33 重力式沉箱碼頭受地震後之格網變形	6-36
圖 7.1 臺北港井下地震及動態水壓監測站示意圖	7-3
圖 7.2 高雄港井下地震及動態水壓監測站示意圖	7-7
圖 7.3 臺北港 2008 年 6 月 2 日 00 時 59 分地震(南北向)	7-8
圖 7.4 臺北港 2008 年 6 月 2 日 00 時 59 分地震(東西向)	7-8
圖 7.5 高雄港 2006 年 12 月 26 日 20 點 34 分地震波	7-9
圖 7-6a 臺北港井下地震儀南北向最大加速度正規化後隨深度變化圖	7-9
圖 7-6b 臺北港井下地震儀東西向最大加速度正規化後隨深度變化圖	7-10
圖 7-6c 臺北港井下地震儀垂直向最大加速度正規化後隨深度變化圖	7-10
圖 7.7 高雄港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖	7-13
圖 7.8 高雄港井下地震儀南北向最大加速度正規化後隨深度變化圖	7-13
圖 7.9 臺北港井下地震站震波放大倍率與地表最大加速度圖	7-14
圖 7.10 高雄港井下地震站震波放大倍率與地表最大加速度圖	7-14
圖 7.11a 蘇澳港地震站 2005 年 3 月 6 日地震之動態孔隙水壓變化	7-17
圖 7.11b 蘇澳港 2005 年地震作用下不同深度之超額孔隙水壓圖 ...	7-18
圖 7.11c 蘇澳港 2007 年 9 月 7 日地震之動態孔隙水壓變化	7-19
圖 7.11d 蘇澳港 2007 年 9 月 7 日地震之動態孔隙水壓變化(大於 0.25Hz)	7-20
圖 7.11e 蘇澳港 2007 年 9 月 7 日地震之動態孔隙水壓變化(小於 0.25Hz)	7-21

圖 7.12a 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化.....	7-22
圖 7.12b 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化(大於 0.08Hz)	7-23
圖 7.12c 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化(小於 0.08Hz)	7-24
圖 7.13 臺北港地震站 1 級震度傅氏頻譜圖.....	7-27
圖 7.14 臺北港地震站 2 級震度傅氏頻譜圖.....	7-27
圖 7.15 臺北港地震站 3 級震度傅氏頻譜圖.....	7-28
圖 7.16 臺北港地震站各級震度平均傅氏頻譜圖.....	7-28
圖 7.17 臺北港地震站 2008 年 6 月 2 日地震不同深度之傅氏頻譜圖	7-29
圖 7.18 臺北港地震站 2008 年 6 月 2 日地震地表相對不同深度土層之 傅氏頻譜比圖	7-30
圖 7.19 高雄港地震站 1 級震度傅氏頻譜圖.....	7-31
圖 7.20 高雄港地震站 2 級震度傅氏頻譜圖.....	7-31
圖 7.21 高雄港地震站 3 級震度傅氏頻譜圖.....	7-32
圖 7.22 高雄港地震站各級震度平均傅氏頻譜圖.....	7-32
圖 7.23 高雄港地震站弱震單站平均頻譜比.....	7-35
圖 7.24 高雄港測站 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分地震加速度歷時....	7-36
圖 7.25 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分強震頻譜比 .	7-36
圖 7.26 高雄港地震站強、弱震單站頻譜比.....	7-37
圖 7.27 2006 年 12 月 26 日 20 時 26 分恆春地震震度分佈.....	7-38
圖 7.28 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分恆春地震震度分佈.....	7-39
圖 7.29 2010 年 03 月 04 日甲仙地震震度分佈(中央氣象局).....	7-39

圖 7.30	高雄港 2006 年 12 月 26 日及 2010 年 3 月 4 日地震	7-40
圖 7.31	高雄港監測站 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分地震之位移反應 譜 ($\zeta=5\%$)	7-40
圖 7.32	高雄港監測站 2006 年 12 月 26 日地震之速度反應譜($\zeta=5\%$)	7-41
圖 7.33	高雄港監測站 2006 年 12 月 26 日地震之加速度反應譜($\zeta=5\%$)	7-41
圖 7.34	高雄港地震監測站恆春地震反應譜三相圖	7-42
圖 7.35	滿州國小(KAU042)地震站實測反應譜圖(中央氣象局)	7-43
圖 7.36	墾丁國小(KAU043)地震站實測反應譜圖(中央氣象局) ...	7-43
圖 7.37	恆春氣象站地震站實測反應譜圖(中央氣象局)	7-44
圖 7.38	高雄氣象地震站實測反應譜圖(中央氣象局)	7-44
圖 7.39	七股氣象地震站實測反應譜圖(中央氣象局)	7-45
圖 7.40	高雄港地震站實測加速度反應譜圖(港研中心)	7-45
圖 7.41	高雄港地震站加速度反應譜圖(0.15g)	7-46
圖 7.42	高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震 PGA 圖	7-47
圖 7.43	高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震隱模態函數組圖 ..	7-47
圖 7.44	高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震時頻分析圖	7-48
圖 7.45	高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震能譜圖	7-48
圖 7.46	高雄港地震站 2006 年 10 月 9 日地震 STFT 法頻譜比圖 ...	7-48
圖 7.47	高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日地震 STFT 法頻譜比圖 ..	7-49
圖 7.48	港區地震資訊網示意圖	7-49
圖 7.49	港區地震資訊網連結地震查詢圖	7-50
圖 7.50	港區近期地震查詢圖	7-50

圖 7.51 港區歷史地震資訊查詢圖	7-51
圖 7.52 港區歷史地震查詢圖-臺北港	7-51
圖 7.53 港區歷史地震查詢圖-高雄港	7-52
圖 7.54 微地動儀現地試驗圖	7-53
圖 7.55 臺北港微地動測站位置圖	7-54
圖 7.56 臺北港區共振主頻等值分佈圖	7-54
圖 7.57 高雄港第四貨櫃中心各測站分佈位置圖	7-55
圖 7.58 高雄港區第四貨櫃中心共振主頻等值分佈圖	7-56
圖 8.1 布袋港地層下陷監測井位置圖	8-5
圖 8.2a 布袋港分層水位變化圖(自記式)	8-6
圖 8.2b 布袋港分層水位變化圖(自記式)	8-7
圖 8.3 布袋港分層水位變化圖(手動量測)	8-8
圖 8.4 布袋港分層水位變化(手動量測)	8-9
圖 8.5 布袋港(200m)分層累積下陷圖(手動量測)	8-10
圖 8.6 布袋港(300m)分層個別下陷量圖	8-11
圖 8.7a 布袋港(300m)分層累積下陷量圖	8-12
圖 8.7b 布袋港(400m)水準基站累積下陷量圖(92/09~97/05)	8-13
圖 8.7c 布袋港(400m)水準基站累積下陷量圖(98/07/03~100/10/20)	8-14
圖 8.8 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測)	8-16
圖 8.9 大鵬灣地層分層下陷觀測圖	8-17
圖 8.10 臺中港分層水位變化圖(手動量測)	8-19
圖 8.11 臺中港分層累積下陷量圖(200m)	8-20
圖 8.12 安平港分層水位變化圖(手動量測)	8-22

圖 8.13 安平港分層累積下陷量	8-23
圖 9.1 查詢系統主畫面	9-5
圖 9.2 基隆港區地圖圖層及選單下拉模.....	9-5
圖 9.3 基隆港區港埠設施現況圖	9-6
圖 9.4 基隆區港埠未來規劃配置圖	9-6
圖 9.5 基隆港區港埠規劃配置對照圖	9-7
圖 9.6 基隆港區港區遙測影像圖	9-7
圖 10.1 蘇澳港區地圖圖層及選單下拉模式.....	10-7
圖 10.2 蘇澳港區鑽探孔位分佈圖	10-7
圖 10.3 蘇澳港區鑽孔柱狀圖	10-8
圖 10.4 地震強度選取對話框	10-8
圖 10.5 蘇澳港區鑽孔 Liao 液化機率分析結果柱狀圖	10-9
圖 10.6 蘇澳港區 Liao+Lai 法全區液化危險性指數分佈圖	10-9
圖 10.7 蘇澳港區 Seed 抗液化安全係數柱狀圖	10-10
圖 10.8 蘇澳港區 Seed+Iwasaki 法全區液化危險性指數分佈圖	10-10
圖 10.9 Lai 液化機率分析方法查詢選單下拉模式	10-13
圖 10.10 蘇澳港區鑽孔 Lai 液化機率分析結果柱狀圖	10-13
圖 10.11 蘇澳港區 Lai_Prob+Lai 法全區液化危險性指數分佈圖	10-14
圖 10.12 蘇澳港區 Lai 抗液化安全係數柱狀圖	10-14
圖 10.13 蘇澳港區 Lai+Iwasaki 法全區液化危險性指數分佈圖	10-15
圖 10.14 地震下陷分析成果圖	10-16
圖 11.1 高雄港貨櫃碼頭分佈位置圖	11-9
圖 11.2 高雄港貨櫃裝卸量選單呈列狀況圖	11-9

圖 11.3 高雄港單一碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪.....	11-10
圖 11.4 高雄港多選碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪.....	11-10
圖 11.5 高雄港全港區貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪.....	11-11
圖 11.6 臺中港貨櫃碼頭分佈位置圖.....	11-11
圖 11.7 臺中港單一碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪.....	11-12
圖 11.8 臺中港多選碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪.....	11-12
圖 11.9 臺中港全港碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪.....	11-13
圖 11.10 基隆港貨櫃碼頭分佈位置圖.....	11-13
圖 11.11 基隆港單一碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪.....	11-14
圖 11.12 基隆港多選碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪.....	11-14
圖 11.13 基隆港全港區貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪.....	11-15
圖 12.1 臺灣港區海氣象觀測資料地理資訊系統流程圖.....	12-2
圖 12.2 高雄港區海氣象查詢表單及潮位測站位置展示圖.....	12-7
圖 12.3 高雄港潮位資料內容選取對話框.....	12-7
圖 12.4 高雄港潮位資料年份選取對話框.....	12-7
圖 12.5 高雄港潮位資料月季選取對話框.....	12-8
圖 12.6 高雄港潮位資料圖查詢結果之一.....	12-8
圖 12.7 高雄港海流資料圖查詢結果之一.....	12-9
圖 13.1 以 Google Earth 時間軸展現災情隨時間變化的情形.....	13-1
圖 13.2 系統服務配置圖.....	13-5
圖 13.3 系統設備架構圖.....	13-5
圖 13.4 本研究建議之多方位災情通報流程.....	13-6
圖 13.5 防救災資料庫系統軟硬體架構圖.....	13-7
圖 13.6 防救災資料庫系統功能架構圖.....	13-9

圖 14.1	臺中港務消防隊之「救災系統」畫面.....	14-2
圖 14.2	臺中港港務消防隊建立之 KML 空間資訊畫面.....	14-2
圖 14.3	影音平台上傳介面.....	14-3
圖 14.4	防救災影像資訊處理示意圖.....	14-4
圖 14.5	災害歷程更新系統畫面.....	14-5
圖 14.6	整合式災情通報系統畫面.....	14-6
圖 14.7	動態災情影音連結系統畫面.....	14-7
圖 14.8	KML 結構化目錄範例.....	14-7
圖 14.9	KML 災情資訊視窗.....	14-8
圖 14.10	火災爆炸模擬空間資訊圖層展示.....	14-10
圖 14.11	ALOHA 模擬外洩擴散分析.....	14-10
圖 14.12	災情影片連結系統畫面.....	14-11
圖 14.13	災情通報系統畫面.....	14-11
圖 14.14	臺北港區 CCTV 系統畫面.....	14-12
圖 14.15	預演現場(6 月 8 日).....	14-13
圖 14.16	預演現場(6 月 15 日).....	14-13
圖 14.17	裝備展示現場(6 月 22 日).....	14-14
圖 14.18	交通部運輸研究所港研中心裝備展示現場(6 月 22 日)....	14-14
圖 14.19	海嘯災害災情管理與更新系統畫面.....	14-16
圖 14.20	臺中港區淹水範圍與深度.....	14-16
圖 14.21	即時影音災情系統畫面.....	14-17
圖 14.22	演習現場(觀禮臺區).....	14-18
圖 14.23	演習現場(陸上實兵演練).....	14-18

表 目 錄

表 2-1	常時計算結果.....	2-5
表 2-2	地震時背填土未液化計算結果	2-9
表 2-3	地震時被填土部份液化計算結果	2-9
表 2-4	板樁式碼頭模型選用數據	2-13
表 2-5	剪力試驗盒外部量測儀器列表	2-22
表 2-6	砂土試體內水壓計配置表	2-24
表 2-7	主樁上應變計配置表	2-24
表 2-8	砂土試體內微型單向加速度計配置表	2-25
表 2-9	試驗輸入地震.....	2-30
表 3-1	動態分析土層參數表	3-14
表 3-2	結構元素參數表	3-14
表 3-3	基樁元素中之 Mohr-Coulomb 介面彈簧參數表	3-14
表 4-1	國內港灣構造物設計基準之三等級設計地震力	4-4
表 4-2	國內建築及橋梁之中度地震所對應的回歸期概略值	4-5
表 4-3	橋梁耐震設計規範之三等級地震力	4-6
表 4-4	耐震功能性水準定性規定之建議	4-7
表 4-5	各重要度等級之碼頭特性	4-8
表 4-6	國內現行港灣構造物設計基準之功能性目標	4-9
表 4-7	本研究建議之各等級碼頭所對應的耐震功能性目標	4-13
表 5-1	重力式碼頭功能性可接受標準	5-3
表 5-2	各類設計方法之應用時機	5-5
表 5-3	非液化工址重力式碼頭變位與安全係數之相關性	5-6

表 6-1	國際航海協會構造物等級	6-4
表 6-2	臺灣結構物之用途係數	6-4
表 6-3	本案例選定之功能目標	6-4
表 6-4	臺中港數值模擬之材料強度參數表	6-25
表 6-5	臺中港數值模擬之界面元素參數表	6-25
表 6-6	臺中港數值模擬之 Finn 模式參數表	6-28
表 7-1	各港區設置井下地震儀資料表	7-2
表 7-2	臺北港 2007~2008 年井下地震觀測資料	7-4
表 7-3	臺北港 2008 年地震站各深度最大加速度表	7-5
表 7-4a	高雄港 2007~2008 年井下地震資料之規模、震央與震源深度	7-11
表 7-4b	高雄港 2009~2010 年井下地震資料之規模、震央與震源深度	7-12
表 7-5	蘇澳港 2007 年井下地震監測資料表	7-15
表 7-6	蘇澳港 2008~ 2009 年井下地震監測資料表	7-16
表 7-7	工址短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數	7-42
表 7-8	臺北港區測站資料	7-53
表 7-9	高雄港區測站資料	7-55
表 11-1	貨櫃碼頭營運設計使用資料檔案及資料錄說明	11-2
表 12-1	資料庫表單之格式及登錄內容	12-1
表 14-1	金華演習參與進度說明	14-9
表 14-2	臺北港區 CCTV 統計表	14-12
表 14-3	海嘯應變演練暨港口保全演練參與進度說明表	14-15

第一章 前言

1.1 計畫緣起

臺灣地處環太平洋地震帶，至目前為止港灣結構物所曾遭遇的最大破壞，乃為烈震強浪所帶來的強烈衝擊及其延生的土壤液化、變形等災害。依據 1989 年美國加州灣區烈震調查，受災最嚴重的位置，均在海灣淤泥層及填土區上，1994 年 1 月 17 日，加州又現烈震，報告指出嚴重災區也多在軟弱地層上。隔年同日(1995 年 1 月 17 日)，日本阪神發生加速度達 833 gal 的烈震，回填區大面積液化，可見震災之分佈與地質條件有絕對密切之關係。1999 年 9 月 21 日，臺灣發生集集大地震，距震央相隔三十餘公里的臺中港，1 號至 4A 等五座碼頭及後線回填曲亦嚴重受創。而 2011 年 3 月 11 日，日本東北發生規模 9 的超級大地震，當地最大災害為海嘯及後續延生的核變，但東京灣等未受海嘯嚴重侵襲的地區依然發現有大面積土壤液化災害。臺灣重要的商港大都座落於疏鬆軟弱之沖積土層與回填之新生地上，在強烈地震作用下，極可能發生結構物震盪損傷，或因土壤液化引發港灣碼頭向海側位移、傾斜與沉陷等災害；

另近 20 年來臺灣沿海地區地層下陷問題嚴重，每遇豪雨暴潮，甚至平時大潮滿潮，即發生海水倒灌，財產損失不貲，布袋、安平兩港正座落於下陷嚴重的嘉南平原地區，因此港區新生地之填土高程，碼頭堤防之設計高程，宜先預留容許下陷量，以防範未然。

對於地震這類不可預知的天然災害，若能事先確知那些地質脆弱區域於地震時可能受創，當可事先採取適當之防範措施。而西南沿海部分地區，仍有持續地層下陷現象，此亦會影響鄰近港區的現有設施及未來發展。對於港灣地區的地震下陷等地質災害，我們不可不審慎防備。因而，本計畫針對港灣地區，進行五大主要工作：(1)港區碼頭動態模型試驗及數值模擬研究，(2)港區各類碼頭結構物耐震能力分析，(3)港區地震及地層下陷分層監測研究，(4)港區工程基本資料庫更

新建置等研究工作，(5) 港區防救災網路地理資訊系統擴建及整合，以提升現有港區受震評估技術，減少地震或下陷災害可能帶來的衝擊，提供港務單位做為規劃設計及防救災決策支援使用。

1.2 計畫目標

針對港區可能發生的強烈地震及地層下陷等災害，本研究設定達成的目標有四：

1. 整合現地監測資料、模型試驗、規範分析及數值模擬，提升現有港區受震評估技術。
2. 持續監測及分析各港區井下地震監測系統及西南重要港灣地區分層下陷資料，提供港區防災之預防措施參考，減少地震或下陷災害可能帶來的衝擊。
3. 結合地理資訊系統技術擴建港灣工程基本資料，提供港務單位規劃設計之應用。
4. 規劃安平港區各類災害(震災、火災、颱風、船舶等災害)之防救策略與標準作業流程，並建置防救災資料庫系統，可供管理單位防救災決策支援使用。

1.3 預期效益

針對港區可能發生的地質災害，本研究規劃達成的基本效益有四：

- 1.整合現地試驗資料、進行碼頭動態模型試驗，提升現有港區碼頭受震評估精度。
- 2.建立本土化基礎土層中碼頭考慮液化土壤-結構互制行為數值模擬。

- 3.持續監測及分析各港區井下地震監測系統及西南重要港灣地區分層下陷資料。
- 4.更新建置港區工程基本資料庫。
- 5.執行港區防救災網路地理資訊系統擴建及整合作業。

第二章 港區碼頭動態模型試驗

2.1 試驗簡介

本計畫首要部分為執行板樁碼頭動態模型試驗，所製作之模型先在剪力盒進行空箱安裝測試，確認其相關邊界條件與整合，並進行砂土回填步驟與程序，經此試驗後始放上震動台進行模型試驗，試驗之波形將先以小振幅white noise進行系統完整性測試，隨後以正弦波震動，最後以設計地震波形震動，另發展相關資料處理程序，並以所得試驗結果進行數值模型修正，利用修正之模型架構，改善現地監測站之地表加速度與結構損壞曲線，提高震後快速災損評估模式之可靠度及回饋設計與分析。

本計畫所需之板樁模型試驗為向國家地震工程研究中心租借六向震動台(shaking table)與雙向層狀剪力盒(bi-directional laminar shear box)作為試驗平台，層狀剪力盒可在有限尺寸模擬自由場土壤震動行為，將自行設計之板樁模型架設於剪力盒內進行white noise、正弦波與設計地震震動，使回填土壤激發孔隙水壓力甚至產生液化。

2.2 極限平衡分析模型設計

2.2.1 模型假設

本研究對板樁式碼頭模型之假設，條列如下：

1. 主樁懸臂長度D為 0.6m，錨碇力施於距主樁頂 0.1m 的位置。
2. 海側及岸側水位面皆在主樁頂部，因此可忽略殘留水壓力之計算。
3. 回填砂質土為均質土，內摩擦角 ϕ 為 30 度。
4. 依據港灣構造物設計基準修定之建議，主動土壓側之壁面摩擦角為 15 度，被動土壓側之壁面摩擦角為 -15 度。

5. 主樁之壁面平行於垂直面，因此壁面與垂直面夾角 ψ 為 0 度。
6. 回填土表面平行於水平面，因此回填土表面與水平面夾角 β 為 0 度。
7. 不施加上載載重，因此上載載重 ω 為 0 t/m^2 。
8. 回填砂質土之飽和單位重 γ_{sat} 為 2 t/m^3 ，水之單位重 γ_w 為 1 t/m^3 。
9. 選用鋁板作為主樁，假設該鋁板容許撓曲應力 σ_{all} 為 1490 t/m^2 。

2.2.2 主樁受力機制假設

本研究分別對常時及地震時之板樁式碼頭受力機制進行分析，其中地震時又分為背填土未液化及背填土部分液化，茲分述如下。

1. 常時

使用模型假設，常時主樁之受力情形可由圖 2.9 簡化為圖 2.1。

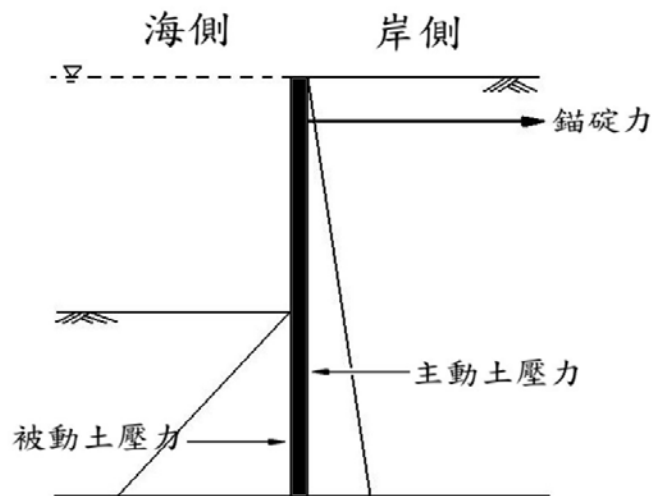


圖 2.1 常時主樁模型之受力情形

主動土壓係數 K_{ai} 可由公式(2.2)簡化為：

$$K_a = \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\cos \delta}} \right]^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

被動土壓係數 K_{pi} 可由公式(2.4)簡化為：

$$K_p = \frac{\cos^2 \phi}{\cos \delta \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin \phi}{\cos \delta}} \right]^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

2.地震時

使用模型假設，且若以水中震度 k' 計算動土壓力，已包含土壤中之動水壓力，因此土壤中之動水壓力不必另行分析。另外，在背填土壤部分液化的受力機制中，本研究假設泥線以上之砂質土完全液化，泥線以下之砂質土未液化。因此主樁之受力情形可分別由圖 2.10 與圖 2.11 簡化為圖 2.2 及圖 2.3。

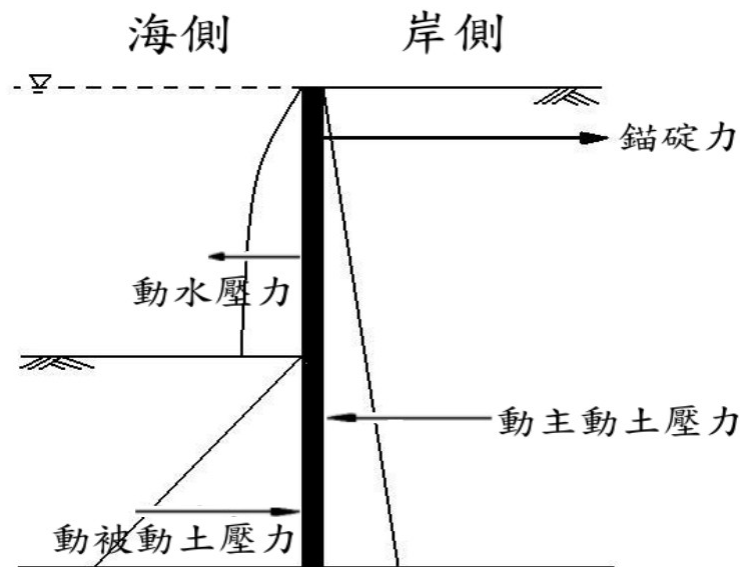


圖 2.2 地震時背填土壤未液化主樁模型之受力情形

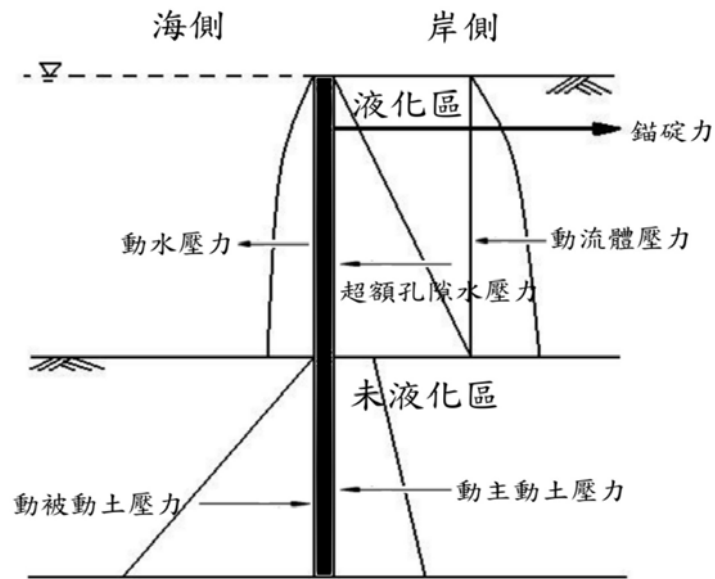


圖 2.3 地震時背填土壤部分液化主樁模型之受力情形

本研究使用工址水平加速度係數 Z 為 $0.1g$ 、 $0.23g$ 及 $0.33g$ 分別進行分析，以做為數值模擬之參考。其中 g 為重力加速度。可由 Z 換算得震度 k ，換算公式如下：

$$k = Z / g \quad Z \leq 0.2g \text{ 時}$$

$$k = \frac{1}{3}(Z / g)^{\frac{1}{3}} \quad Z > 0.2g \text{ 時} \dots\dots\dots (2.3)$$

使用模型假設，動主動土壓係數 K_{ae} 可由公式(2.9)簡化為：

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \theta)}{\cos(\delta + \theta)}} \right]^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

動被動土壓係數 K_{pe} 可由公式(2.11)簡化為：

$$K_{pe} = \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{\cos \theta \cos(\delta - \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi - \delta) \sin(\phi - \theta)}{\cos(\delta - \theta)}} \right]^2} \dots\dots\dots (2.5)$$

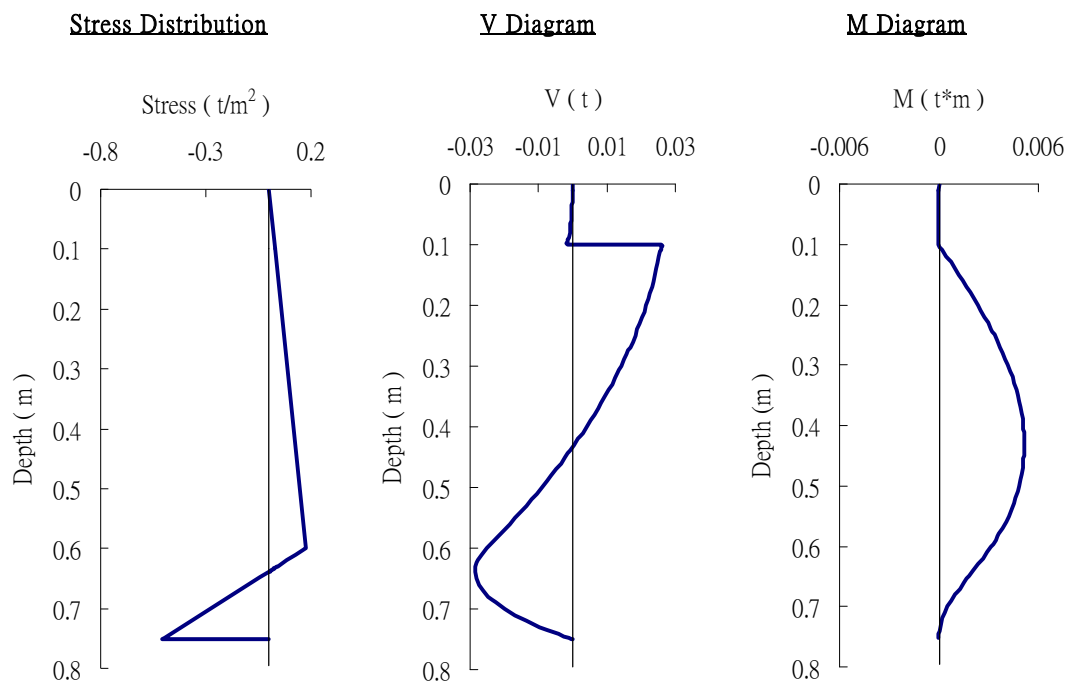
2.2.3 結果整理

將本研究之模型假設、受力機制假設代入板樁式碼頭 excel 試算檔，結果整理於此節。圖 2.4~2.6 分別表示不同受力機制下之計算結果，(a)圖代表 FES method、(b)圖代表 MOTC method。各圖由左至右分別為主樁之壓力分佈圖、剪力圖及彎矩圖，圖中之縱座標表示主樁上某點與主樁頂之距離，橫座標表示該點所承受之壓力、剪力及彎矩，向右為正，向左為負。縱軸之長度代表設計主樁長(即主樁之懸背長度 0.6m 加上設計貫入深度 D_{design})，值得一提的是，FES method 是以理論貫入深度 D_{theory} 進行計算，因此圖僅繪至理論主樁長(即主樁之懸背長度 0.6m 加上理論貫入深度 D_{theory})為止。由圖中亦可看出 FES method 在 d 達到理論主樁長時彎矩為零，而 MOTC method 則在 d 達到貫入深度 0.6m 時彎矩為零，此結果與兩種方法之假設吻合。

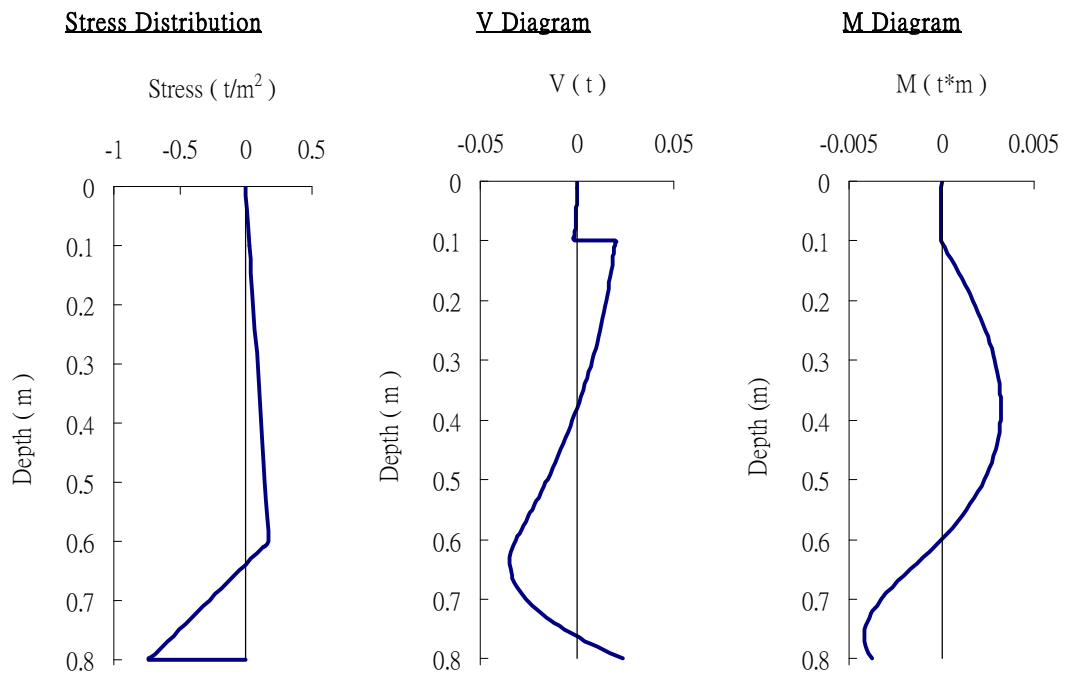
將所有的計算結果彙整於表 2-1 至表 2-3 與圖 2.7 至圖 2.8。圖 2.7 表示常時與地震時背填土未液化之受力機制下，兩種方法的結果比較，圖 2.8 則表示地震時背填土部分液化之受力機制下，兩種方法的結果比較。由圖中可看出，由 FES Method 求得之結果皆大於 MOTC Method 之結果，由此可知前者較為保守。在地震時的受力機制下，當水平工址加速度係數 Z 增加時，兩法的設計貫入深度差距幾乎為定值，但在錨碇力、最大彎矩及斷面模數方面，隨著水平工址加速度係數 Z 增加，兩法的差距會有增大的趨勢。

表 2-1 常時計算結果

	FES	MOTC
$D_{design}(m)$	0.2	0.2
$T(t)$	0.0273	0.021
$M_{max}(t * m)$	0.0032	0.0051
$S(m^3)$	3.46E-6	2.15E-6

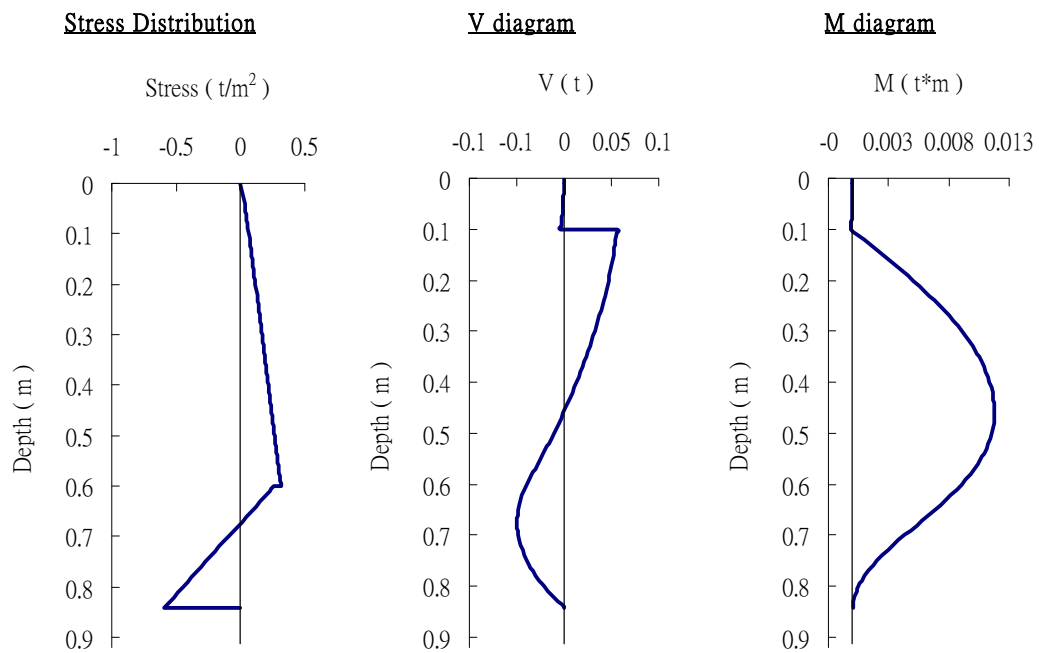


(a) FES method

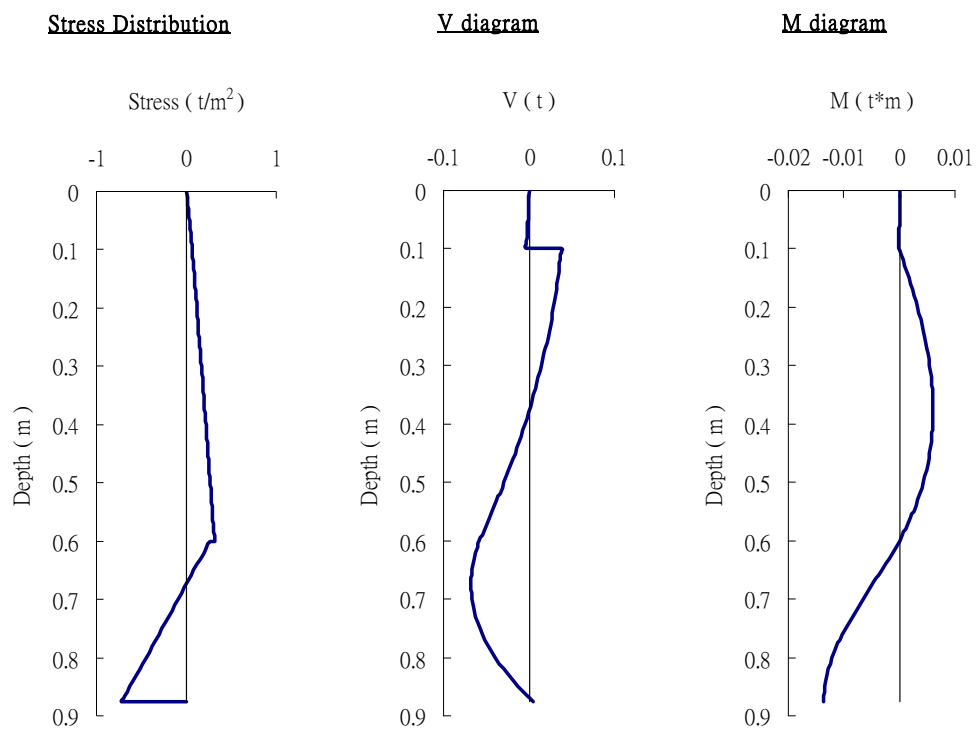


(b) MOTC method

圖 2.4 常時計算結果

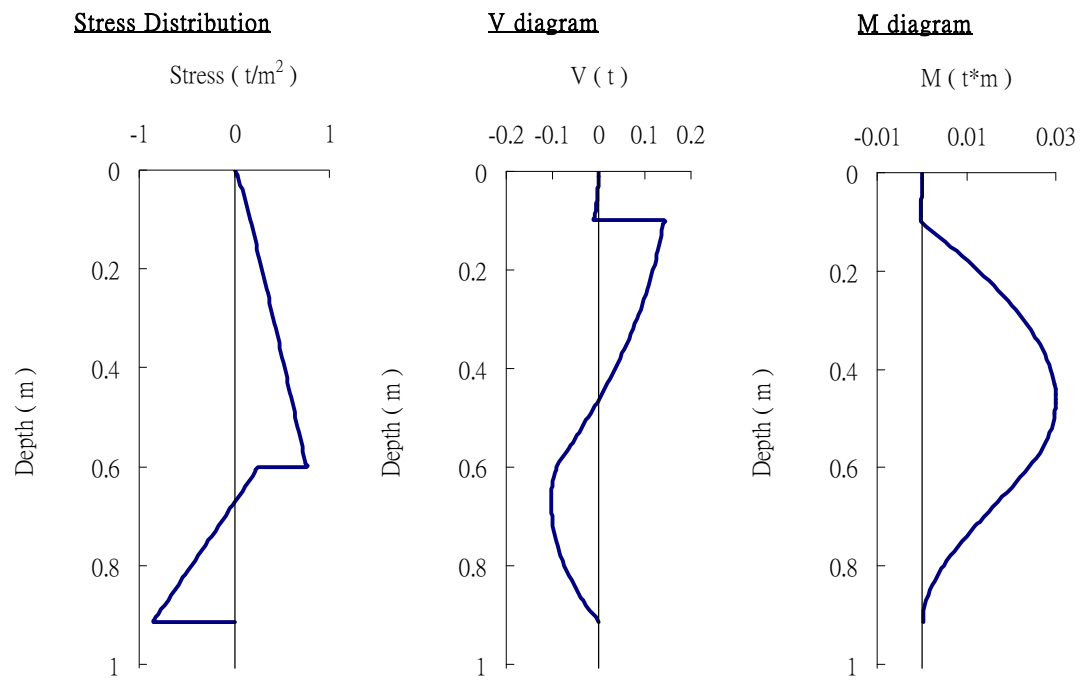


(a) FES method

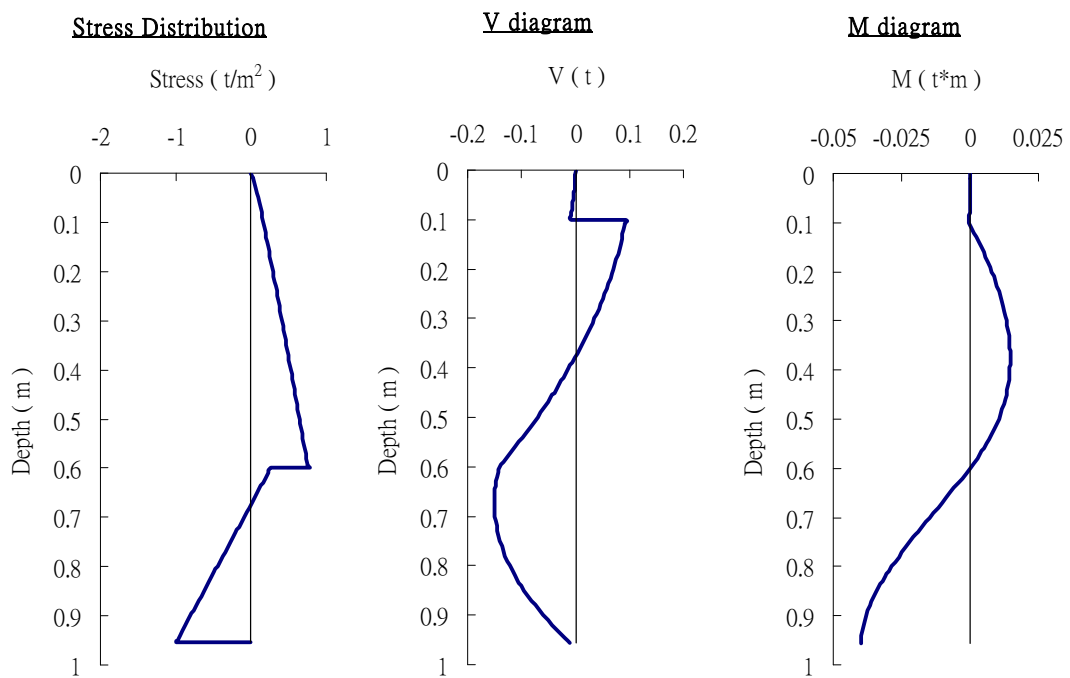


(b) MOTC method

圖 2.5 地震時背填土未液化($Z=0.1g$)計算結果



(a) FES method



(b) MOTC method

圖 2.6 地震時背填土部分液化($Z=0.1g$)計算結果

表 2-2 地震時背填土未液化計算結果

	FES			MOTC		
Z	0.1g	0.23g	0.33g	0.1g	0.23g	0.33g
D_{design} (m)	0.313	0.589	0.754	0.276	0.541	0.714
T (t)	0.0596	0.1268	0.1635	0.0415	0.0716	0.0825
M_{max} (t m)	0.0118	0.0295	0.0414	0.006	0.0103	0.0119
S (m ³)	7.90E-6	2.0E-5	2.78E-5	4.04E-6	6.9E-6	7.96E-6

表 2-3 地震時被填土部份液化計算結果

	FES			MOTC		
Z	0.1g	0.23g	0.33g	0.1g	0.23g	0.33g
D_{design} (m)	0.408	0.663	0.816	0.355	0.6	0.763
T (t)	0.1502	0.2259	0.2606	0.1022	0.1338	0.1417
M_{max} (t m)	0.0301	0.05	0.0617	0.0147	0.0185	0.0194
S (m ³)	2.02E-5	3.35E-5	4.14E-5	9.84E-6	1.24E-5	1.30E-5

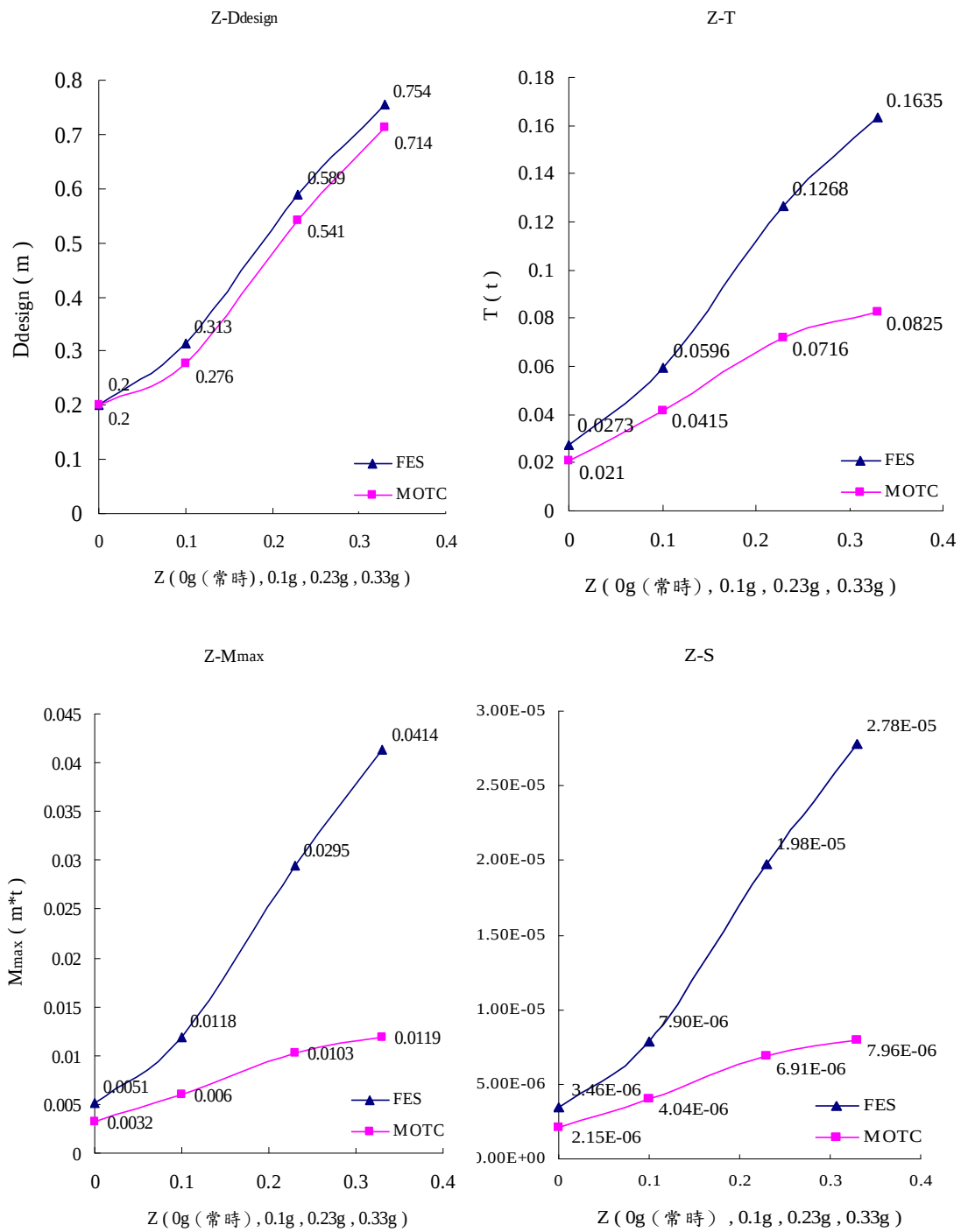


圖 2.7 常時與地震時背填土未液化計算結果

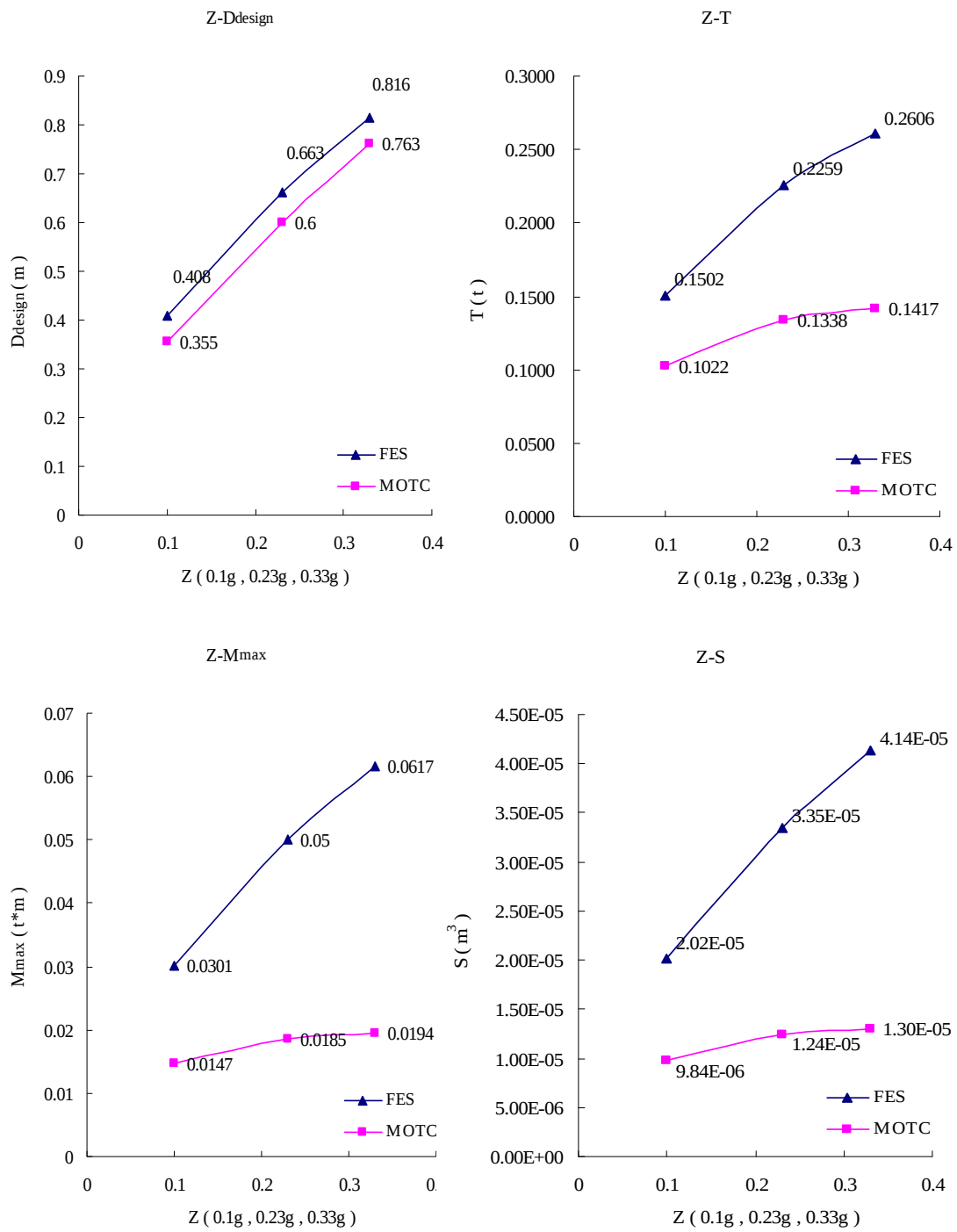


圖 2.8 地震時背填土部分液化計算結果

2.2.4 板樁式碼頭模型之建立

本研究將使用國家地震工程研究中心的六向震動台與雙向層狀剪力盒作為試驗平台，層狀剪力盒之組成以上下十五層內外複合框架組合而成，試驗盒之內框尺寸為 188 cm×188 cm×152 cm，外框尺寸為 194 cm×234 cm×152 cm，而土壤試體置於內框中。另外配合本研究 FES 常時之計算結果作為板樁式碼頭數值模擬的參考，因若使用地震時之計算結果，主樁之設計貫入深度會過長，無法置入空間有限之剪力盒中，而若選用常時之計算結果，主樁之設計貫入深度較短，在架設板樁式碼頭模型後、未施加地震波時，得以確保架設後結構體之穩定性，因此選用常時的計算結果，設計貫入深度 D_{design} 為 0.20 m，錨碇力 T 為 0.273 t，最大彎矩 M_{max} 為 0.0051 mt，斷面模數 S 為 $3.46\text{E-}6\text{ m}^3$ ，在主樁總長為 1.0 m 的情形下，利用斷面模數 S 可求得主樁厚度 t 約為 5 mm。

綜合極限平衡分析與數值分析結果，規劃之板樁系統為以 5 mm 厚之鋁板製作板樁，貫入海床深度為 40 cm，錨定系統以直徑 2 mm，長度為 50 cm 之鋁桿連結鋼索，錨定鋁桿間距為 30 cm，其模型規劃如數值模型圖 2.9 與表 2-4 所示，量測規劃包含岸側自由場、海床自由場及緊鄰板樁之土壤加速度(加速度計)與孔隙水壓力(孔隙水壓計)監測，另外結構系統監測將包括板樁曲率(成對應變片)、板樁相對位移(動態剖面儀)及樁頂加速度反應。

表 2-4 板樁式碼頭模型選用數據

層狀剪力盒內框	長度 B (m)	1.88
	寬度 B (m)	1.88
	高度 H (m)	1.52
主樁	懸背長度 D (m)	0.6
	設計貫入深度 D_{design} (m)	0.4
	寬度 b (m)	1.5
	厚度 t (m)	0.005
	海側距框壁距離 L_1 (m)	0.6
	岸側距框壁距離 L_2 (m)	1.28
	兩側與框壁距離 s' (m)	0.19
錨碇樁	長度 h (m)	0.5
	頂端距地表面距離 h' (m)	0.1
	樁徑 (m)	0.02
	間距 s (m)	0.3
錨碇桿	長度 ℓ (m)	0.5
	桿徑 (m)	0.002

2.3 試驗設備

2.3.1 大型雙軸向剪力試驗盒

本研究使用大型雙軸向剪力試驗盒（翁作新等, 2001）模擬錨碇式板樁碼頭於半無限空間土層中之受震行為。此剪力試驗盒由十五層內外複合框架組合而成，剪力試驗盒內框尺寸長寬高分別為 188 cm、188 cm 及 152 cm，外框尺寸長寬高分別為 194 cm、234 cm 及 152 cm。在外框之外有鋼性外牆以供支撐（圖2.10）。試驗之砂土試體及錨碇式板樁碼頭模型置於內框中進行受震模擬。在剪力試驗盒外框之相對邊上裝設有成對的線性滑軌，以提供外框相對於外牆在 X 方向的滑動，而內框上亦有成對線性滑軌之裝置，以提供內框相對於外框在 Y 方向的滑動（圖2.11）。如此設計，剪力試驗盒便可模擬雙軸向的土層震動。

另外考慮到柔性邊界之運動機制，剪力試驗盒之內外框皆以十五層框架堆疊而成，在試驗過程中雖然單一框架本身因具有相當之剛性而無法產生變形，但各框架間可存在水平向的相對運動，因此剪力試驗盒中之砂土試體在縱剖面上可隨地震波作用而變形（圖2.12）。

在試驗過程中，為了維持剪力試驗盒內砂土試體之水密性，以模擬飽和砂土試體在受震液化過程中超額孔隙水壓的激發情形，本試驗採用厚度為 3 mm 的矽膠膜做為防水材料，固定於內框上（圖2.13）。

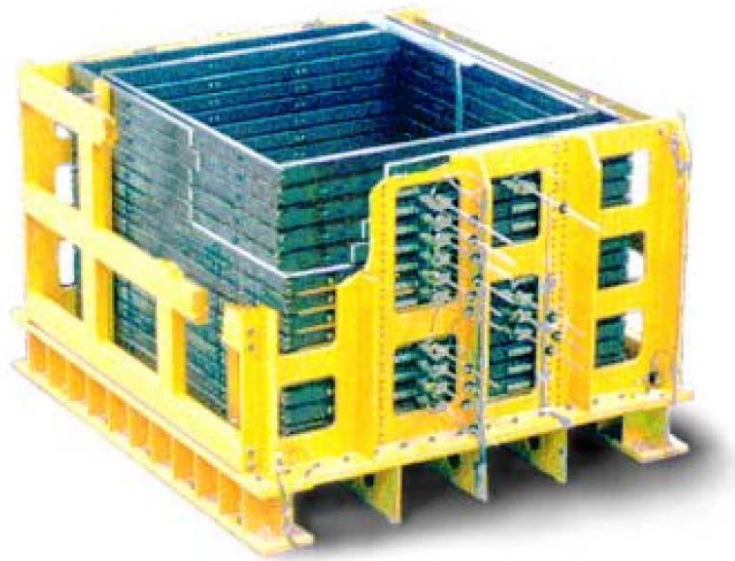


圖 2.10 雙軸向剪力試驗盒外觀 (翁作新等，2001)

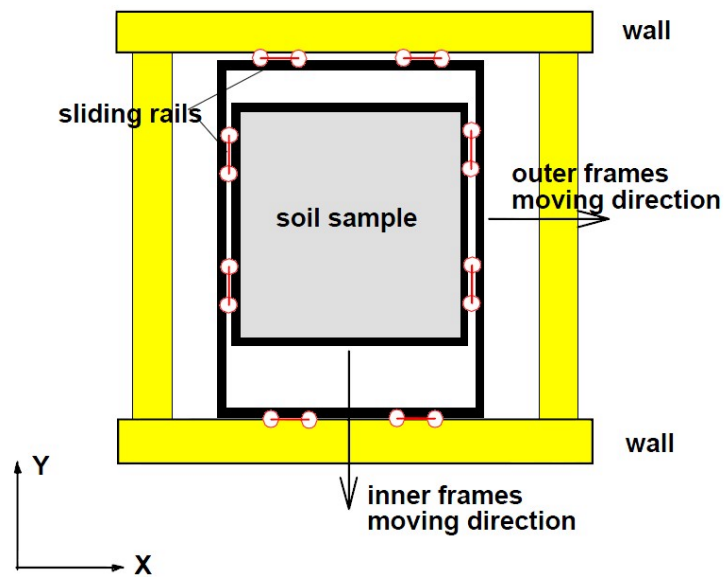


圖 2.11 內外複合框架配合兩組滑軌 (翁作新等，2001)

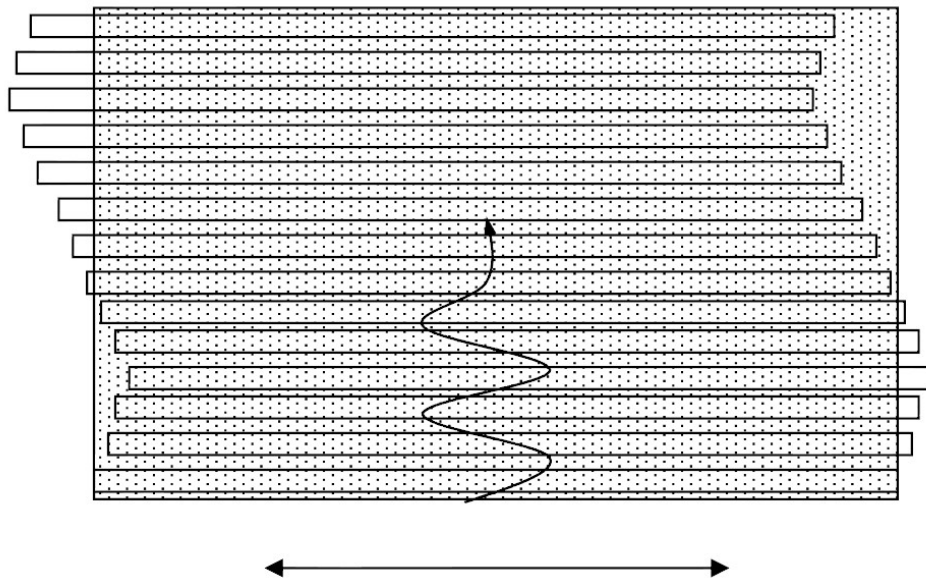


圖 2.12 剪力試驗盒運動型態示意圖（翁作新等，2001）

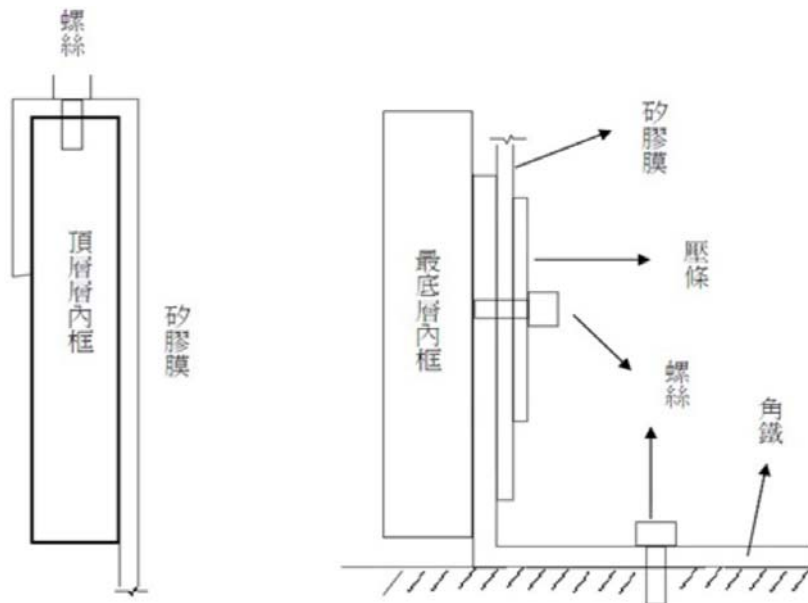


圖 2.13 砂膠膜裝設示意圖

2.3.2 大型砂土質落箱

本試驗採用固定式質落裝置，進行試體準備工作(圖 2.17)。質落裝置共分為三大部分：

1. 質落箱本體 (圖 2.14)。
2. 可抽換式多孔盤 (圖 2.15)。
3. 分散器 (圖 2.16)。

「質落箱本體」用以放置試驗用土樣，其底板鑽有平均分布之孔洞，使砂土通過孔洞下落，孔洞之孔徑為 40 mm。在質落箱本體下方接以「可抽換式多孔盤」，其孔徑分別有 15 mm、20 mm、30 mm 及 40 mm，可視需要選用。質落的開始與結束以按壓控制鈕加以控制，因可抽換式多孔盤之開關由一組電動馬達控制，使開關動作可在一秒內完成，因此消除因開關時間不一致而使空間上質落量不均之虞慮。在可抽換式多孔盤下方接有「分散器」，即四面相隔 7 cm 的篩網，網目大小為 4.76 mm，線徑為 1.6 mm，並彼此交錯成 45° ，以達到砂土均勻質落入剪力試驗盒內之目的。

本試驗之質降法採用濕沉降法，進行方式為於剪力試驗盒內注入足夠高度的水，使質落完成後水面高度仍高於砂面高度。注水量與落砂量之控制，可依從前使用濕沉降法所得的試體孔隙比經驗概略估算。濕沉降法可使砂土顆粒在落入剪力試驗盒之水中後，因受到水之阻力而達終端速度，並趕散附著於砂土顆粒上之空氣及塵埃，達到均勻飽和之試體準備目的。根據翁作新等於 2003 年之試驗結果，濕沉降法的砂土試體準備結果如下：

1. 均勻性：砂土經由空氣質落至注水剪力試驗盒中時，部份砂土顆粒直接沉降至剪力試驗盒底部，而較慢落下的部份則持續受到上部落砂之衝擊，在水中不斷翻湧，直至質落結束後才緩慢沉降。根據試驗觀察，濕沉降法之試體準備方法可得到平整的砂土試體表面。

2. 飽合度：砂土在經過一段時間的翻湧後，附著於砂土顆粒上密度較小之空氣及塵埃會被趕散而懸浮於水面上。賈落完成後，砂土試體內部並未發現明顯的大氣泡顆粒。



圖 2.14 賈落箱本體裝填欲賈落之越南砂

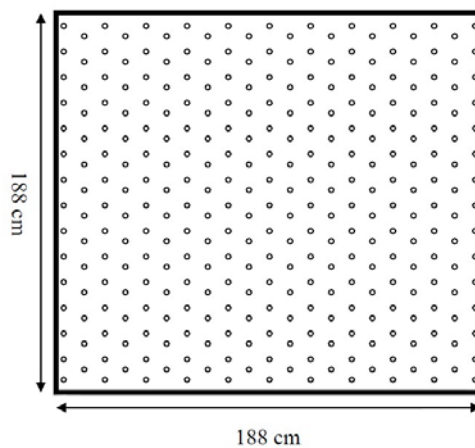
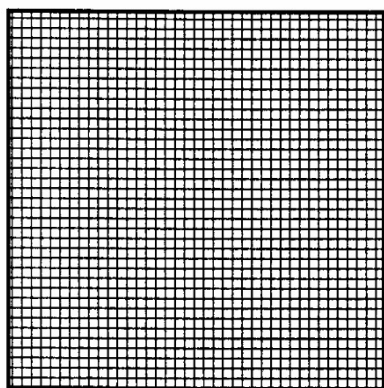
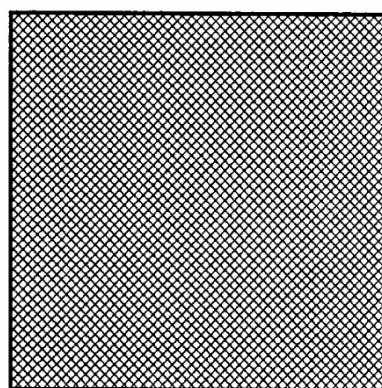


圖 2.15 賈落箱本體與可抽換式多孔盤之孔位配置圖(翁作新等,2003)



第一、三層篩網



第二、四層篩網

圖 2.16 分散器－貫落箱底部篩網（翁作新等，2003）



圖 2.17 以貫落裝置進行試體準備

2.3.3 量測儀器與配置

土壤液化現象為土壤結構變化（剪應變）與孔隙水壓激發之耦合行為，因此土壤受震後之反應（加速度、速度及位移）及超額孔隙水壓歷時為研究飽和砂土試體受震反應之重要量測物理量，因此本研究使用以下幾類量測儀器用以對土壤受震液化反應進行監測，而量測儀器配置主要參考本研究期中報告之數值模型監測點位，以利於試驗結果與數值模型結果之比較。

1. 裝設於剪力試驗盒外部（圖 2.18、表 2-5）

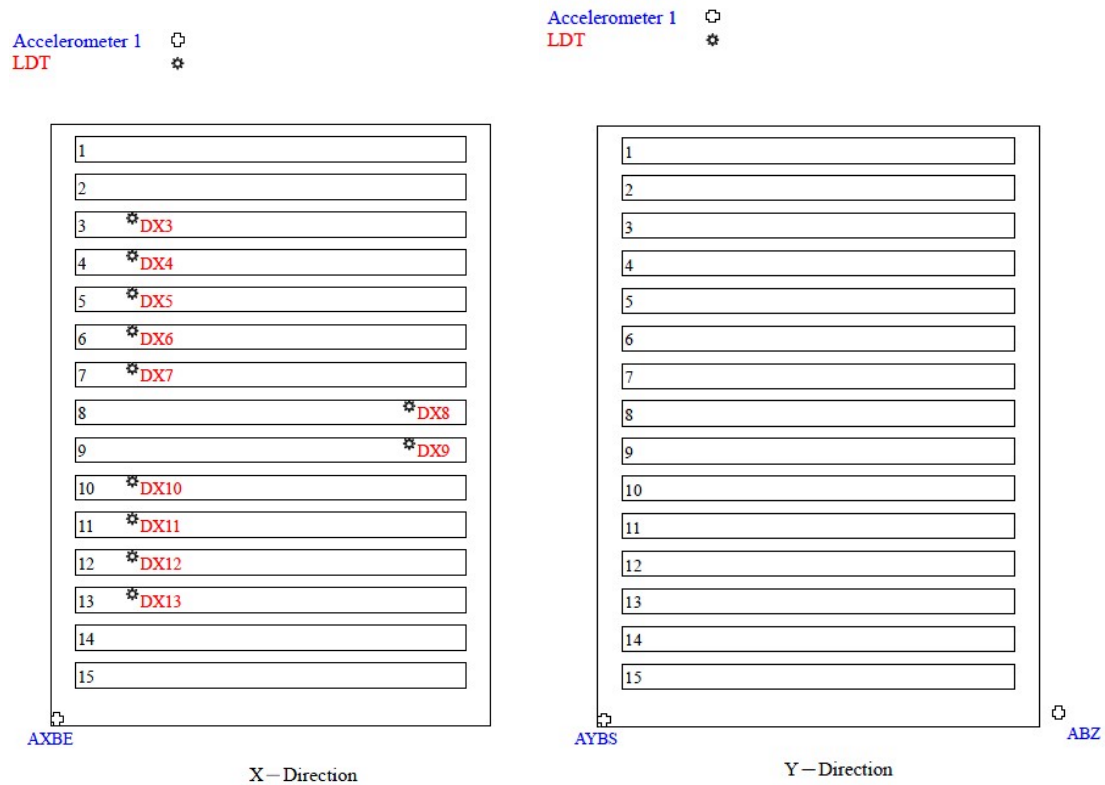
- (1) 位移計。
- (2) 加速度計。

2. 裝設於砂土試體內部（圖 2.19）

- (1) 水壓計：共 19 個。（表 2-6）
- (2) 微型單向加速度計：X 方向共 23 個，Y 方向共 3 個（表 2-8）。

3. 裝設於主樁模型表面（圖 2.19）

- (1) 應變計：面海側共 4 個，回填側共 4 個（表 2-7）。
- (2) Shape array：裝設於回填側。

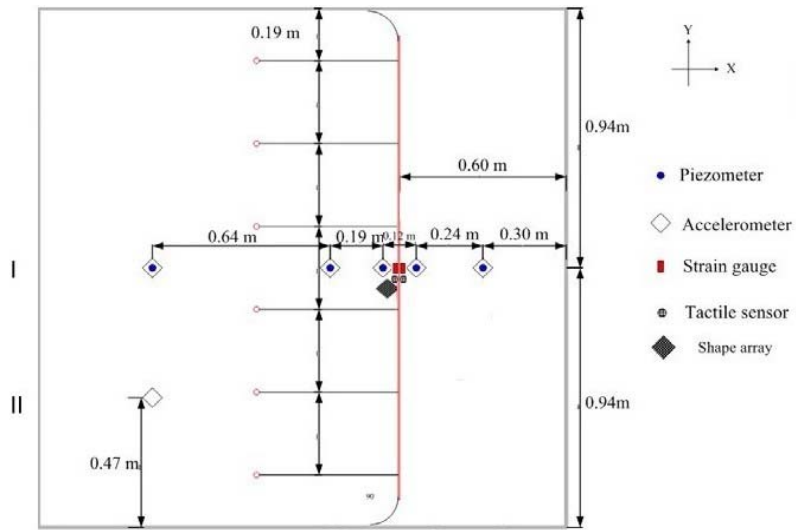


(a) 內框 (b) 外框

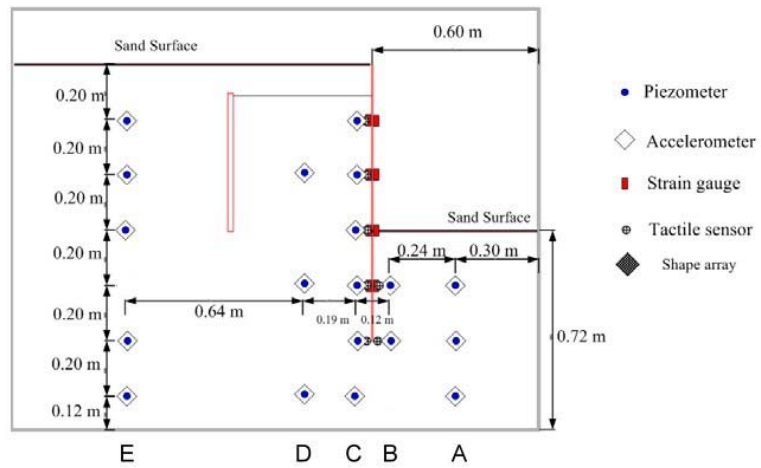
圖 2.18 剪力試驗盒外部之位移計、加速度計配置圖

表 2-5 剪力試驗盒外部量測儀器列表

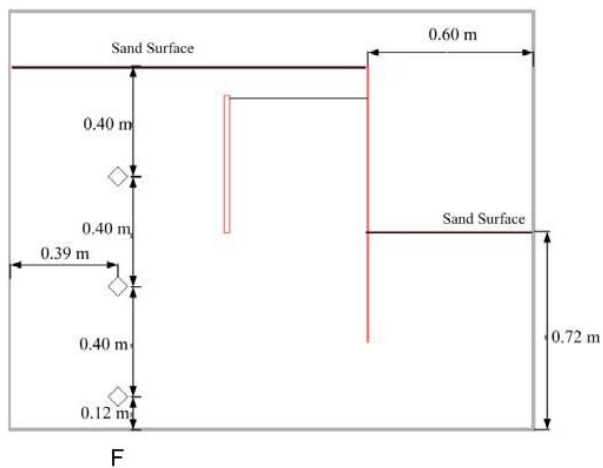
儀器	裝設位置	數量		
		X 方向	Y 方向	Z 方向
位移計 (LDT)	外牆	1	1	0
	框架	11/內框	0	0
加速度計 (Accelerometer)	外牆	1	1	2
	框架	1/內框	1/外框	0



(a) 上視圖



(b) 側視圖 (斷面 I)



(c) 側視圖 (斷面 II)

圖 2.19 砂土試體內部與主樁量測儀器配置圖

表 2-6 砂土試體內水壓計配置表

水壓計編號	位置	高程 (cm)
WP1	A1	12
WP2	A2	32
WP3	A3	52
WP4	B1	32
WP5	B2	52
WP6	C1	12
WP7	C2	32
WP8	C3	52
WP9	C4	72
WP10	C5	92
WP11	C6	112
WP12	D1	12
WP13	D2	52
WP14	D3	92
WP15	E1	12
WP16	E2	32
WP17	E4	72
WP18	E5	92
WP19	E6	112

表 2-7 主樁上應變計配置表

應變計編號	位置	高程 (cm)
SG1-1	回填側	52
SG2-1		72
SG3-1		92
SG4-1		112
SG1-2	面海側	52
SG2-2		72
SG3-2		92
SG4-2		112

表 2-8 砂土試體內微型單向加速度計配置表

微型單向加速度計編號	位置	高程 (cm)
PCBA1X	A1	12
PCBA2X	A2	32
PCBA3X	A3	52
PCBB1X	B1	32
PCBB2X	B2	52
PCBC1X	C1	12
PCBC2X	C2	32
PCBC3X	C3	52
PCBC4X	C4	72
PCBC5X	C5	92
PCBC6X	C6	112
PCBD1X	D1	12
PCBD2X	D2	52
PCBD3X	D3	92
PCBE1X	E1	12
PCBE1Y	E1	12
PCBE2X	E2	32
PCBE3X	E3	52
PCBE3Y	E3	52
PCBE4X	E4	72
PCBE5X	E5	92
PCBE5Y	E5	92
PCBE6X	E6	112
PCBF1X	F1	12
PCBF2X	F2	52
PCBF3X	F3	92

2.4 試體準備與試驗步驟

2.4.1 錨碇式板樁碼頭模型之架設

本研究之錨碇式板樁碼頭模型尺寸及配置主要依照期中報告之規劃進行，唯小部分為配合實際需要做細部更動，最終選用模型規劃如圖 2.20 所示。此外，為防止砂土之承載力不足造成錨碇式板樁碼頭模型沉陷，本研究在主樁頂部鑽以 6 個孔洞，以水線將主樁懸吊於一橫跨剪力試驗盒內框上之角鋁，並於主樁底部固定一根長度與主樁寬度相當之角鋁，其用意同於基樁之擴展基腳，以此避免錨碇式板樁碼頭模型之沉陷。但為模擬錨碇式板樁碼頭受震液化後的側潰傾倒情形，懸吊主樁之水線於 Event 8 前予以剪除。

錨碇式板樁碼頭模型架設步驟條列如下：

1. 於主樁表面標定出欲固定量測儀器之點位。
2. 於主樁兩側分別固定一 0.5 cm 厚之軟性墊板。
3. 將量測儀器包含應變計及 Shape array 固定於主樁上。
4. 在主樁底部固定一角鋁，並將主樁以水線懸吊於剪力試驗盒內。
5. 將錨碇樁以水線懸吊於剪力試驗盒內，並以 20 # 之鐵線作為錨碇桿，固定於主樁及錨碇樁之間。

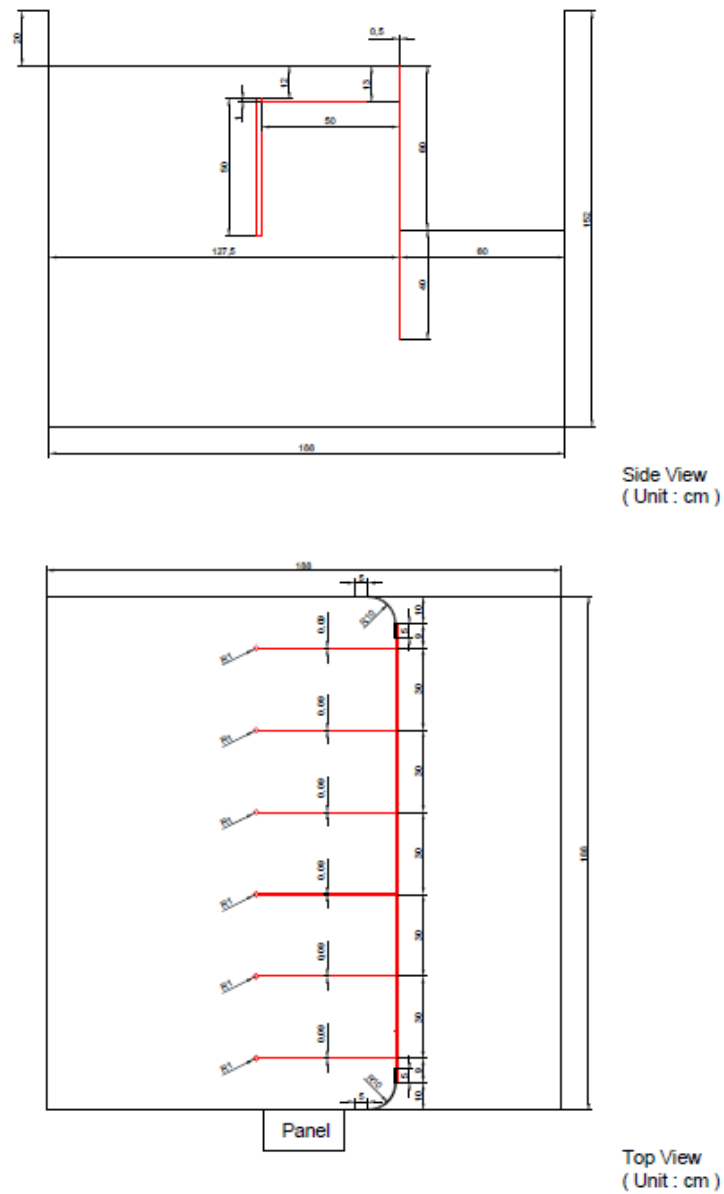


圖 2.20 錨碇式板樁碼頭模型配置圖

2.4.2 量測儀器之架設

砂土試體內部之量測儀器包含微型單向加速度計及水壓計。其綁設步驟條列如下：

1. 以釣線依照欲綁設量測儀器之座標拉出經緯線，固定於剪力試驗盒外牆上。並拉以垂直向之釣線固定於剪力盒底部。

2. 於垂直向之釣線上標出量測儀器之綁設高程。
3. 將水壓計以膠帶按設計高程固定於釣線上，並注意水壓計上之透水石應外露，以達監測效果。
4. 將微型單向加速度計按設計高程固定於釣線上。因加速度之量測有方向性之考量，在固定微型單向加速度計時須特別注意。
5. 固定量測儀器之釣線，將於試驗進行前全數剪斷，以移除釣線對量測儀器隨試體震動之限制。

2.4.3 砂土質降與人工回填

本研究選用之砂土為越南峴港所產之石英砂，此砂土已多次用於國家地震工程中心振動台液化試驗(翁作新、李偉誠，2003)。越南砂為均勻級配砂，比重為2.65，有效粒徑(D_{10})為0.32mm，(D_{60})為0.6mm，均勻係數 C_u 為1.875，最大與最小孔隙比為0.911與0.612，細粒料含量小於1%。

因錨碇式板樁碼頭模型之面海側及回填側砂面高程不同，而無法全程使用質落裝置進行砂土試體準備。本研究之砂土試體準備主要分為三個階段：

1. 注水入剪力試驗盒中。
2. 使用質落箱質落
3. 人工回填。

依照試驗規劃，第一階段在剪力試驗盒內注入足夠高度的水，使質落完成後水面高度仍高於砂面高度。注水量與落砂量之控制，可依從前使用濕沉降法所得的試體孔隙比經驗概略估算。第二階段以質落箱質落砂土至挖泥線高程（圖2.17），第三階段再以人工回填錨碇式板樁碼頭模型之回填側至主樁頂部（圖2.21）。然而在第一階段完成時，回填側砂面高程與目標高程相去不遠，但發現主樁底部些微向回填側傾斜，且面海側砂面高程遠低於回填側（約 10 至 15 cm），推

估可能原因為砂土賁落時之衝力衝擊主樁，使主樁底部向回填側傾斜，並對面海側造成遮蔽，使主樁之兩側落砂量不均勻。因此在第一階段完成後，先以人工回填的方式回填面海側至目標高程，再對回填側進行回填。回填完成後，靜置試體約 24 小時，待砂土完全沉澱後完成試體準備（圖2.22）。

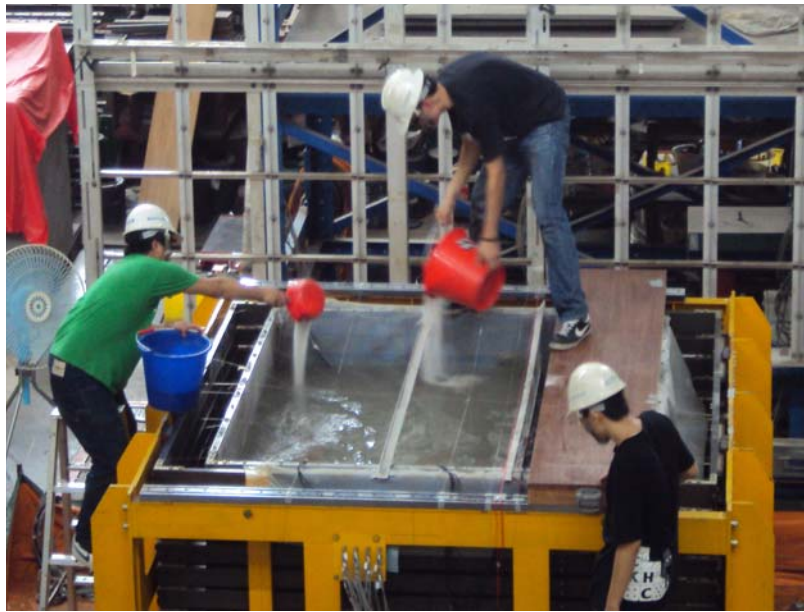


圖 2.21 人工回填



圖 2.22 試體準備完成圖

2.4.4 地震模擬

本研究之輸入地震先以小震幅白噪音(white noise)進行系統完整性測試，隨後以正弦波進行試驗，於試驗進行期間，依據錨碇式板樁碼頭模型受震後的反應，調整輸入地震之震幅，直至模型完全傾倒破壞。值得一提的是，相較於砂土回填完成時主樁之明顯彎曲變形，試驗結束後開挖出之主樁，無明顯變形，顯示主樁在破壞後的變形仍在鋁材的彈性範圍內，此與最初設計試驗欲達到的主樁破壞模式構想吻合。本次試驗共進行了 10 個不同的 Event，輸入地震資訊如表 2-9 所示，初步分析以Event 5 及Event 10 說明，Event 5為產生部分孔隙水壓力激發但板樁系統不產生破壞，Event 10 為土壤產生液化且系統產生破壞。

表 2-9 試驗輸入地震

輸入地震	X 方向 (NS)		
	頻率 (Hz)	最大加速度 (g)	延時 (sec)
Event 1	白噪音 (頻寬 30 Hz)	0.03	60
Event 2	1	0.03	15
Event 3	2	0.03	7.5
Event 4	1	0.05	15
Event 5	1	0.075	15
Event 6	1	0.1	15
Event 7	1	0.1	15
Event 8	1	0.1	15
Event 9	1	0.075	15
Event 10	1	0.2	15

2.4.5 試驗資料量測

在試驗進行過程中，所有量測儀器之資料記錄，除了Shape array 於個人電腦中記錄外，其餘量測儀器所測得資料皆由國家地震工程研

究中心震動台控制室統一記錄。另外，本研究在每個 Event 結束後，皆以人工方式量測試體之砂面及水面高程，用以了解試體受震後之沉陷情形。

2.5 試驗資料處理與呈現

2.5.1 資料分析架構

本研究所使用之量測儀器如2.3.3節所列，包括架設於剪力試驗盒外部之加速度計及位移計，架設於砂土試體內之微型單向加速度計及水壓計，以及架設於主樁上之應變計及 Shape array。本研究對各量測儀器資料處理流程及資料間相互關係如圖2.23 所示，並於以下各小節詳述。

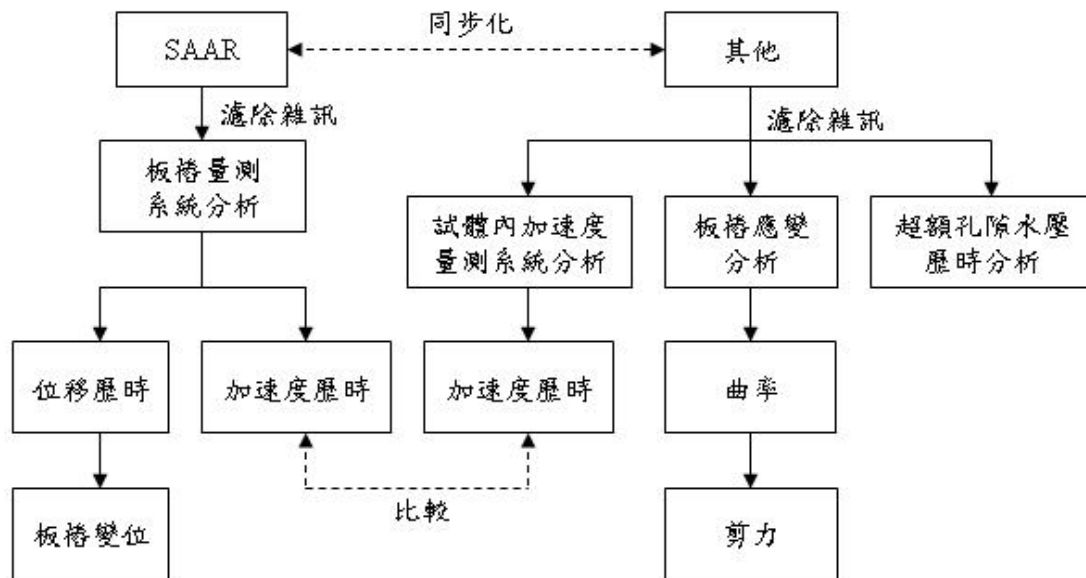


圖 2.23 資料處理架構

2.5.2 加速度計及位移計資料分析

本研究在剪力試驗盒分層框架上分別架設了 11 個 X 方向的位移計，用以了解各土層受震之運動情形。在剪力試驗盒外牆之 X 方向、

Y 方向上亦各架設了 1 個位移計，其量測資料可了解剪力試驗盒在輸入地震後的反應果效。加速度計及位移計之結果，可以透過加速度之兩次微分或位移的兩次積分兩相比較，也可將加速度做一次積分和位移做一次微分為速度相互比較。

圖2.24 為 Event 5 剪力試驗盒整體之 X 方向與 Y 之位移歷時，由圖可知，在 X 方向的震動下，剪力試驗盒除了產生 X 方向之位移外，仍會有 Y 方向之位移，其值約唯 X 方向位移之 10 %。

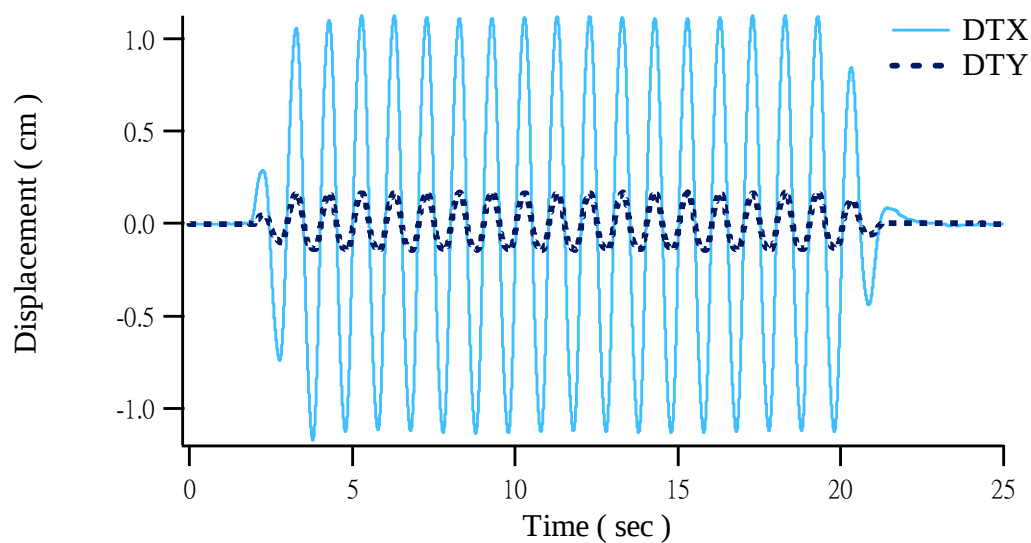
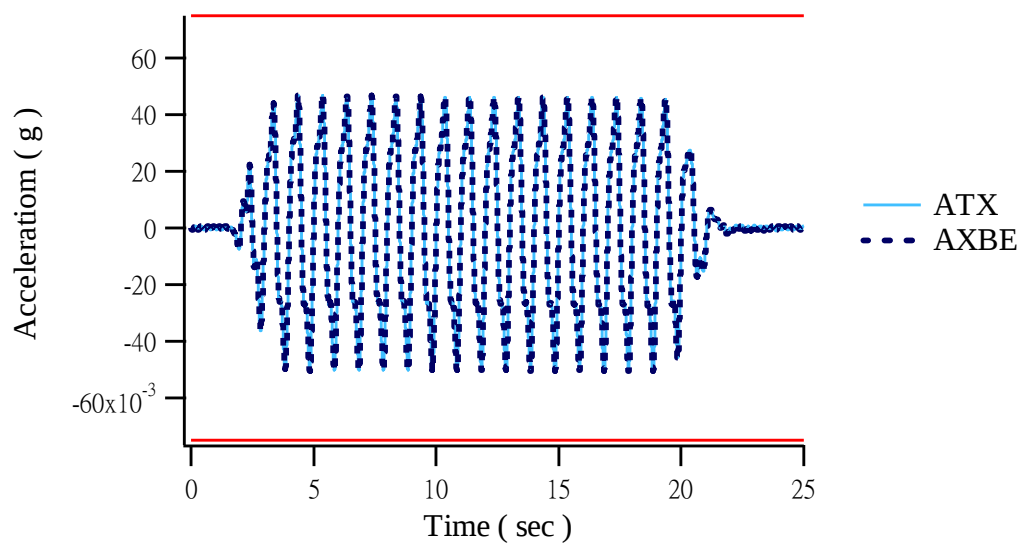
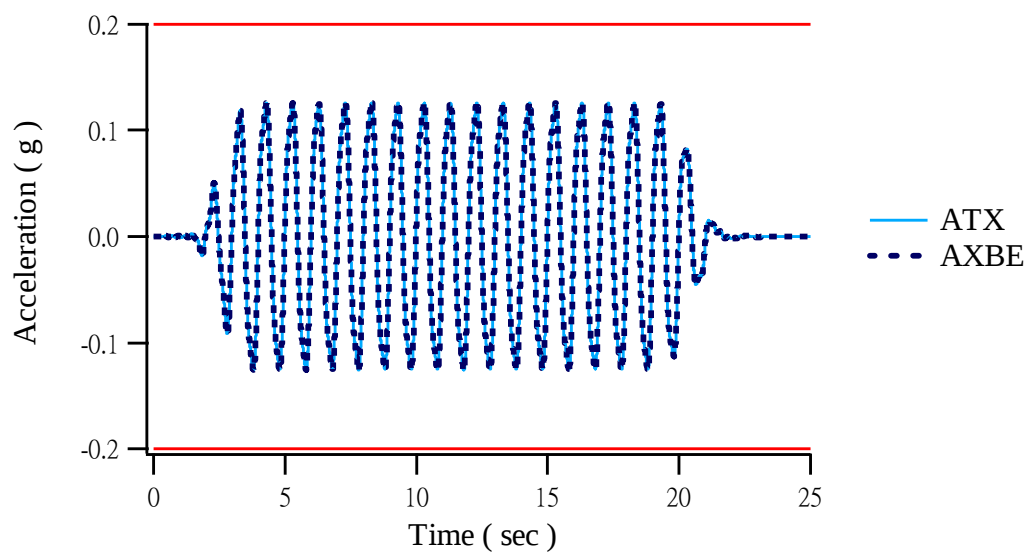


圖 2.24 Event 5 剪力試驗盒整體位移歷時

圖2.25 為 Event 5 與 Event 10 之剪力試驗盒整體 X 加速度歷時，ATX 裝設於剪力試驗盒外牆頂部，AXBE 則位於底部，圖頂及圖底之兩條水平線為該 Event 輸入地震之最大加速度，由圖可知，剪力試驗盒頂底之加速度歷時與震幅皆一致，但最大加速度僅約為輸入地震之 63 %。



(a) Event 5



(b) Event 10

圖 2.25 剪力試驗盒整體加速度歷時

2.5.3 水壓計資料分析

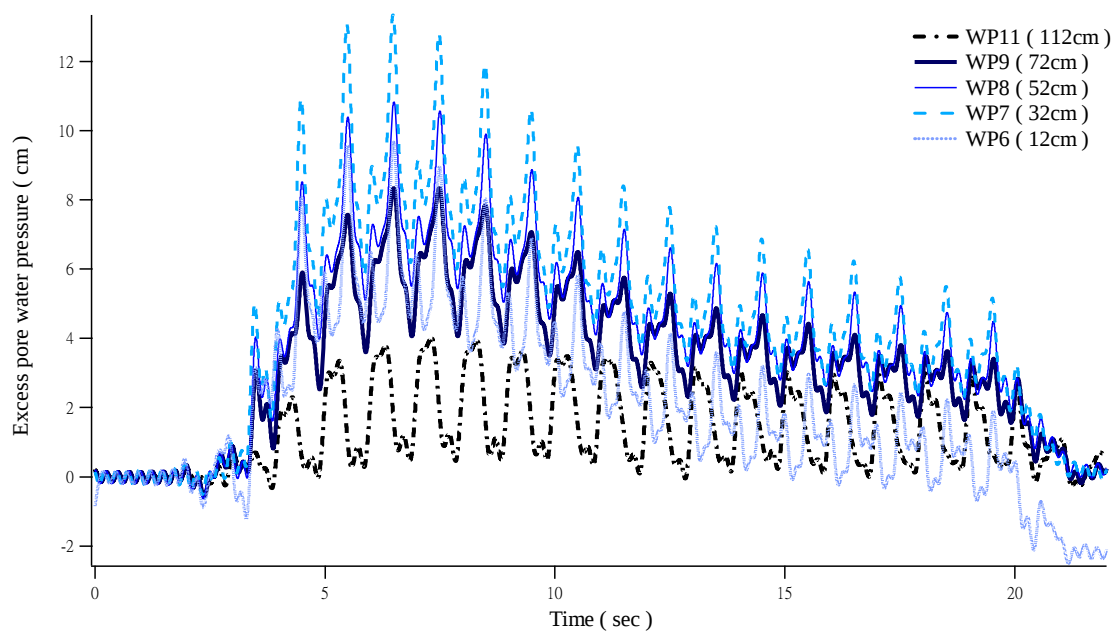
在震動台震動過程中，砂土試體因受到反覆剪動而造成其結構發生改變，並且同時激發試體內部之超額孔隙水壓力。本研究在砂土試體中埋設了 19 個水壓計，由圖2.19 (b) 可知在主樁的面海側及回填

側距離主樁 6 cm、25 cm 處，皆埋設了一縱列之水壓計，用以監測錨碇式板樁碼頭模型近場區之超額孔隙水壓力激發情形，而在距離錨碇式板樁碼頭模型較遠處亦埋設有一縱列之水壓計，用以監測自由場之超額孔隙水壓力激發情形。量測得之資料皆以切斷頻率 4 Hz 之低通濾波濾除雜訊，而後分別繪出不同剖面各高程之超額孔隙水壓力歷時。圖2.26 為 Event 5 與 Event 10 於主樁之回填側距主樁 6 cm 處（即斷面C），各高程之超額孔隙水壓力歷時。

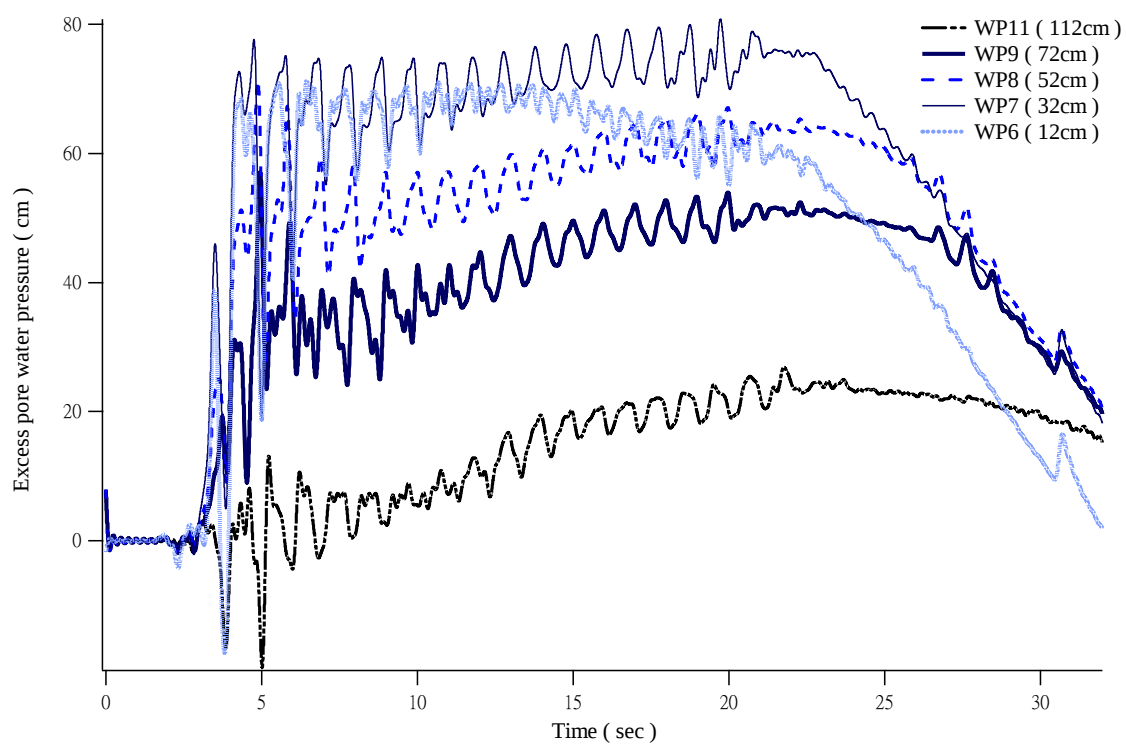
2.5.4 微型單向加速度計資料分析

本研究在埋設水壓計之相同點位皆同時埋設以微型單向加速度計，用以了解不同點位砂土試體質點之受震反應。因本次試驗輸入地震以 X 方向之正弦波為主，因此微型單向加速度計之量測方向亦以 X 方向為主，但為驗證在 X 方向震動下，砂土試體在 Y 方向之運動反應，因此在自由場已埋設 X 方向微型單向加速度計處（斷面E），擇取三個點位，同時埋設以 Y 方向的加速度計。所擷取之加速度資料，以帶通濾波（0.2 Hz ~ 4 Hz）濾除雜訊。圖2.27 為 Event 5 及 Event 10 於斷面E 中高程 52 cm 之點位 X 方向與 Y 方向之加速度歷時比較。

圖2.28 為 Event 5 與 Event 10 於主樁之回填側距主樁 6 cm 處（斷面C），各高程之試體質點運動加速度歷時。若將此斷面之微型單向加速度計記錄資料與主樁上裝設之 Shape array 之加速度讀數互相比較，可了解鄰近主樁處之砂土試體質點受震反應與板樁受震反應間之相互關係。Shape array 之資料分析於 2.5.5 小節詳述。

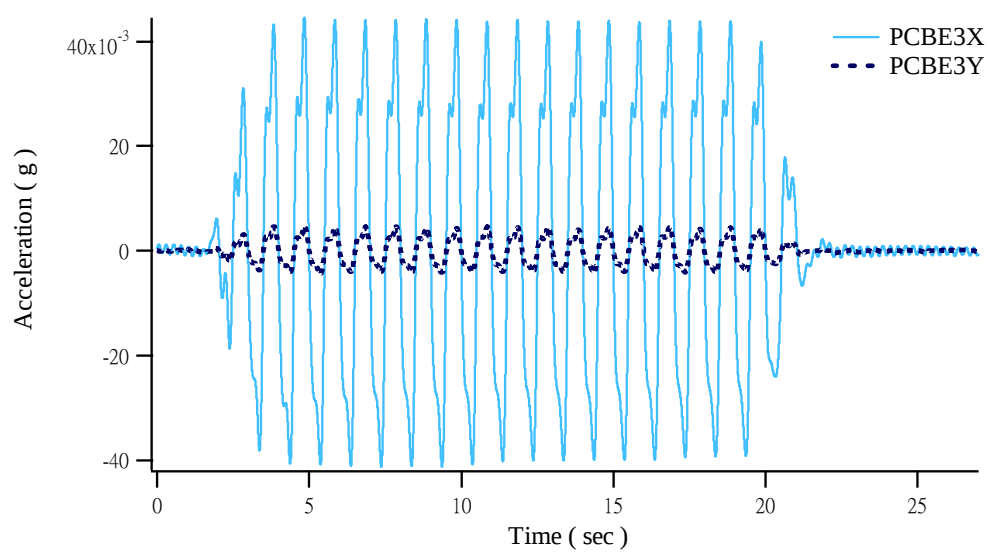


(a) Event 5

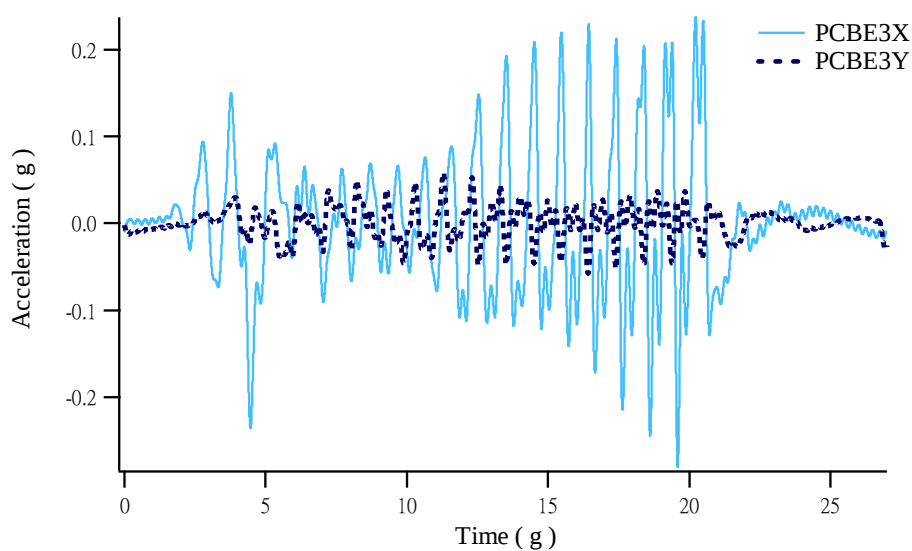


(b) Event 10

圖 2.26 斷面 C 之超額孔隙水壓歷時

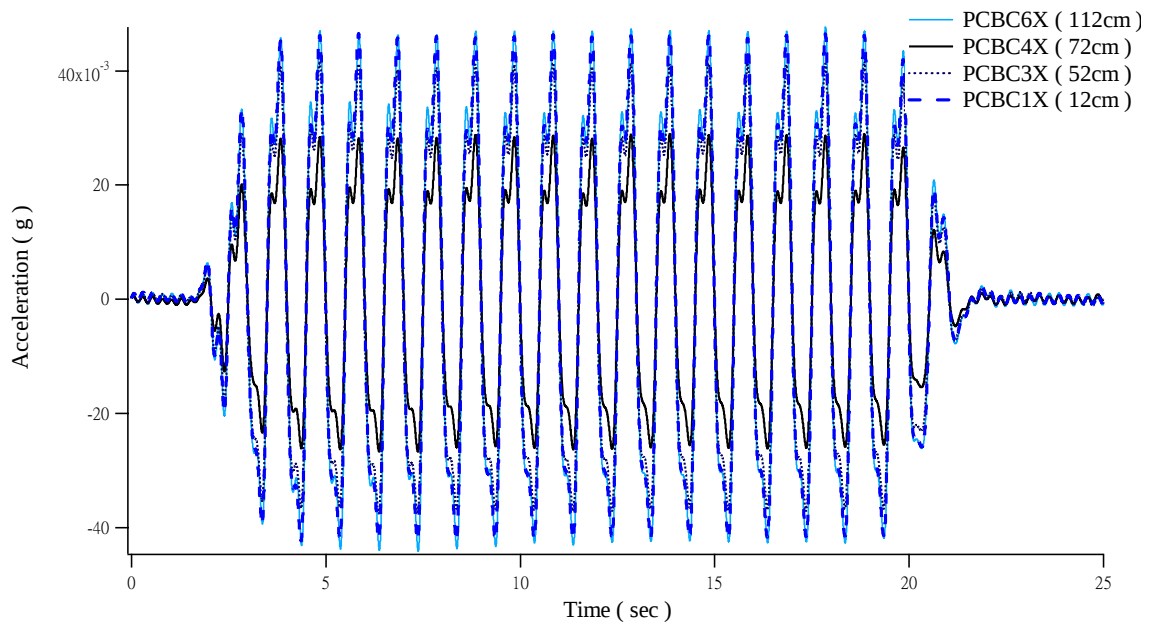


(a) Event 5

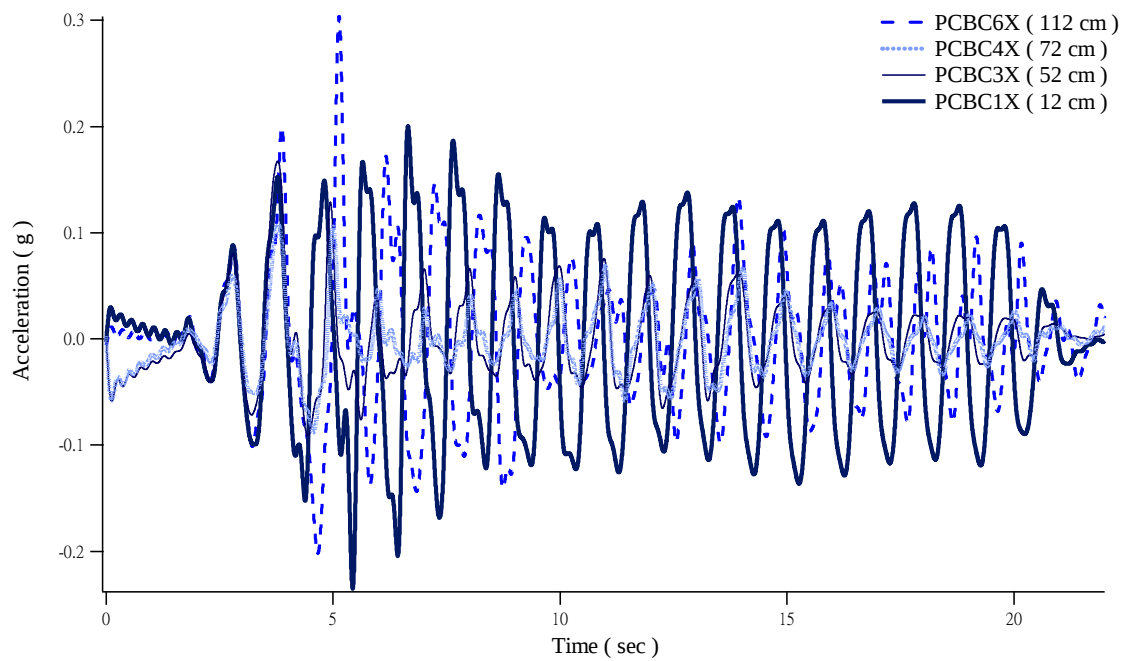


(b) Event 10

圖 2.27 斷面 E 之加速度歷時



(a) Event 5



(b) Event 10

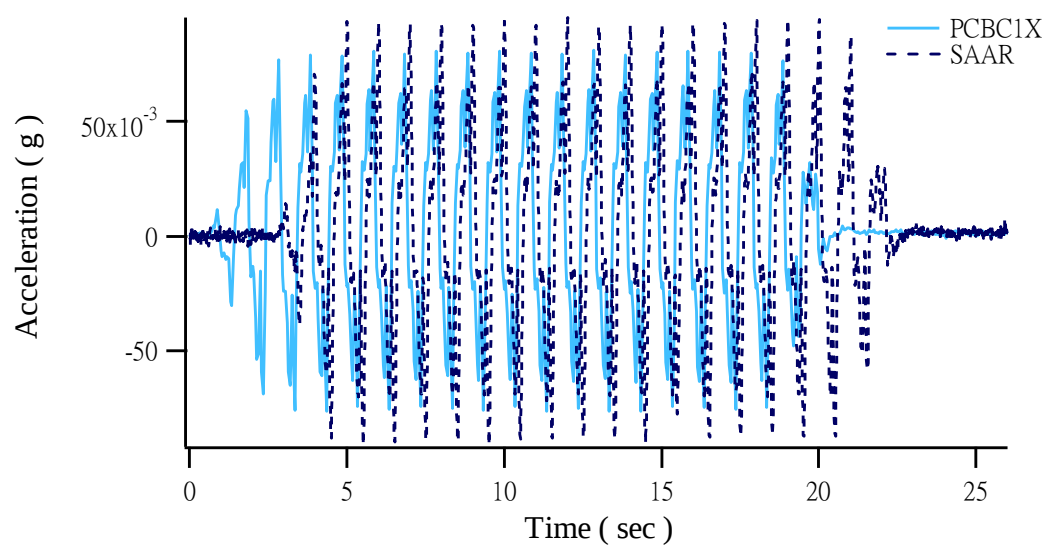
圖 2.28 斷面 C 之加速度歷時

2.5.5 Shape array 資料分析

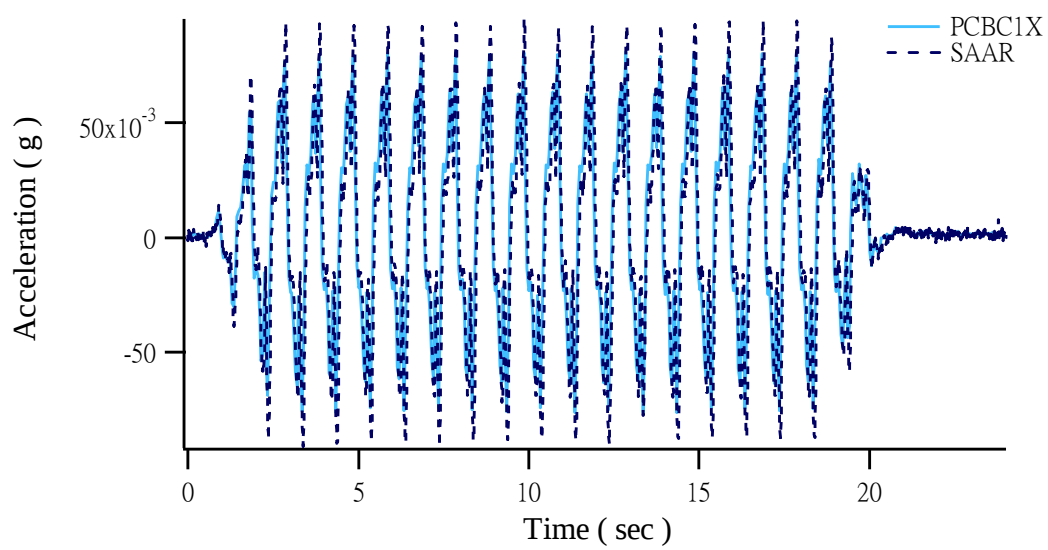
本研究將 Shape array 裝設於主樁回填側鄰近中心線之位置，由底部至頂部縱向裝設，如圖2.19 所示。Shape array 為一長型帶狀之量測儀器，於頂底並中間段等間距設定節點，節點與節點中間有感測子可量測該點位之質點加速度及轉角，再經過 Shape array 中內建之微處理器對加速度及轉角資料進行積分而得到質點變位，因此可了解受測試體之變位情形。本次試驗所使用之 Shape array 分為 8 段共 9 個節點，因此可得到 8 個點位的加速度記錄，及 9 個點位的位移記錄。Shape array 可縱向裝設測得受測試體質點之側向變位，或水平向裝設得到質點垂直變位，本研究採用前種裝設方式，如此測得主樁受震後之側向變位歷時。

在進行 Shape array 資料分析之前，須先對資料進行同步化處理，其原因為 Shape array 之資料擷取為獨立運作，開始擷取時間不同於由震動台控制室統一擷取之量測儀器。同步化之方式為將 Shape array 最底端節點之加速度資料與砂土試體最底部微型單向加速度計之資料互相比較，將 Shape array 之加速度歷時在時間軸上作平移，使兩者之首次波峰時間點一致（圖2.29）。

如2.5.4節所述，Shape array 測得之加速度資料可與微型單向加速度計之資料互相比較，因此使用一致之帶通濾波（0.2 Hz ~ 4 Hz）濾除雜訊，以利兩者之比較。圖2.30 與圖2.31 分別為 Event 5 與 Event 10 Shape array與微型單向加速度計鄰近點位之加速度歷時比較，圖中之圖示顯示該點位之高程，由圖2.30 與圖2.31 可知，除了 Event 10 最底部之微型單向加速度計資料大於 Shape array 資料外，其餘皆有前者小於後者之趨勢。而在位移方面，為得到主樁受震後之永久變形，因此使用低通濾波（切斷頻率 4 Hz）濾除位移資料之雜訊，圖2.32 與圖2.33 分別為 Event 5 與 Event 10 Shape array 之主樁位移記錄。



(a) 同步化前



(b) 同步化後

圖 2.29 Shape array 同步化

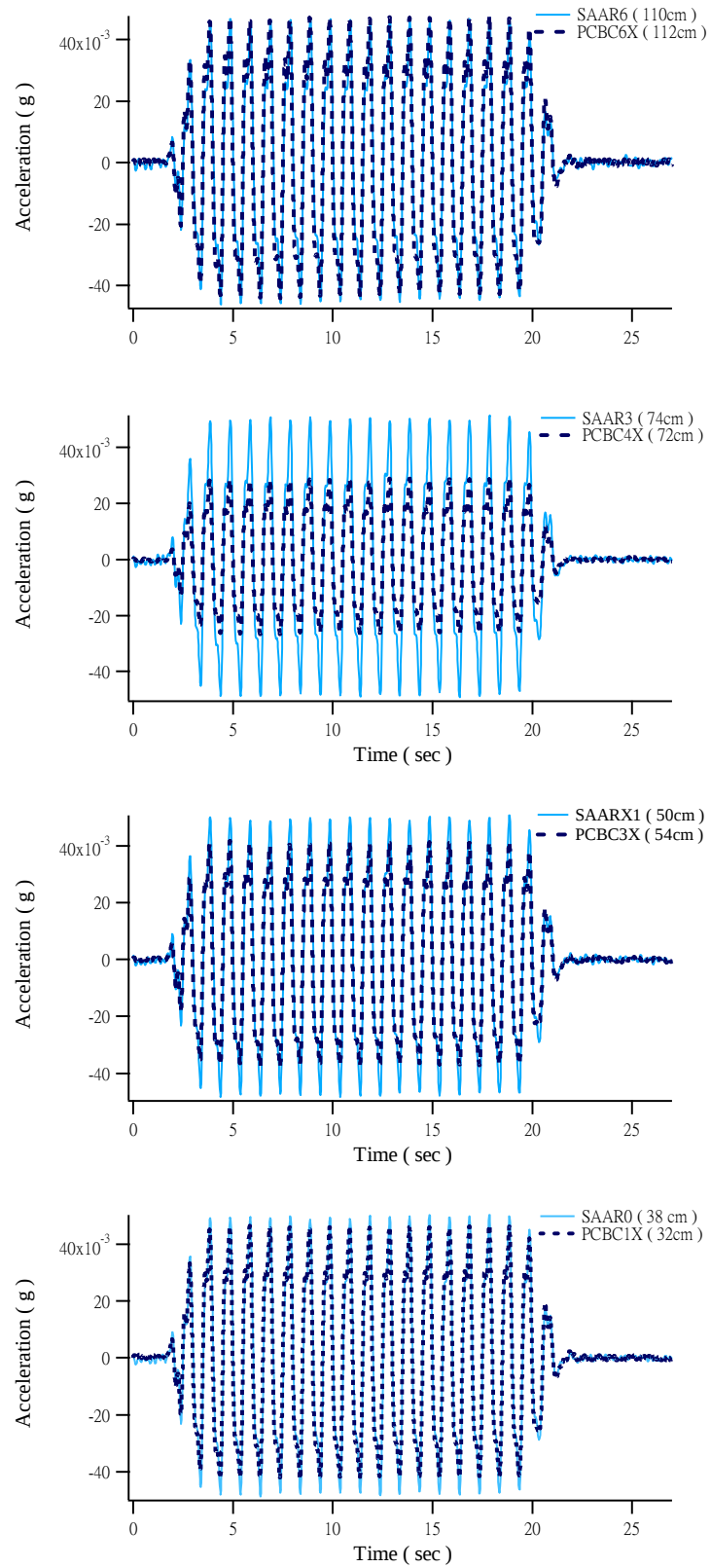


圖 2.30 Event 5 之 Shape array 與微型單向加速度計之比較

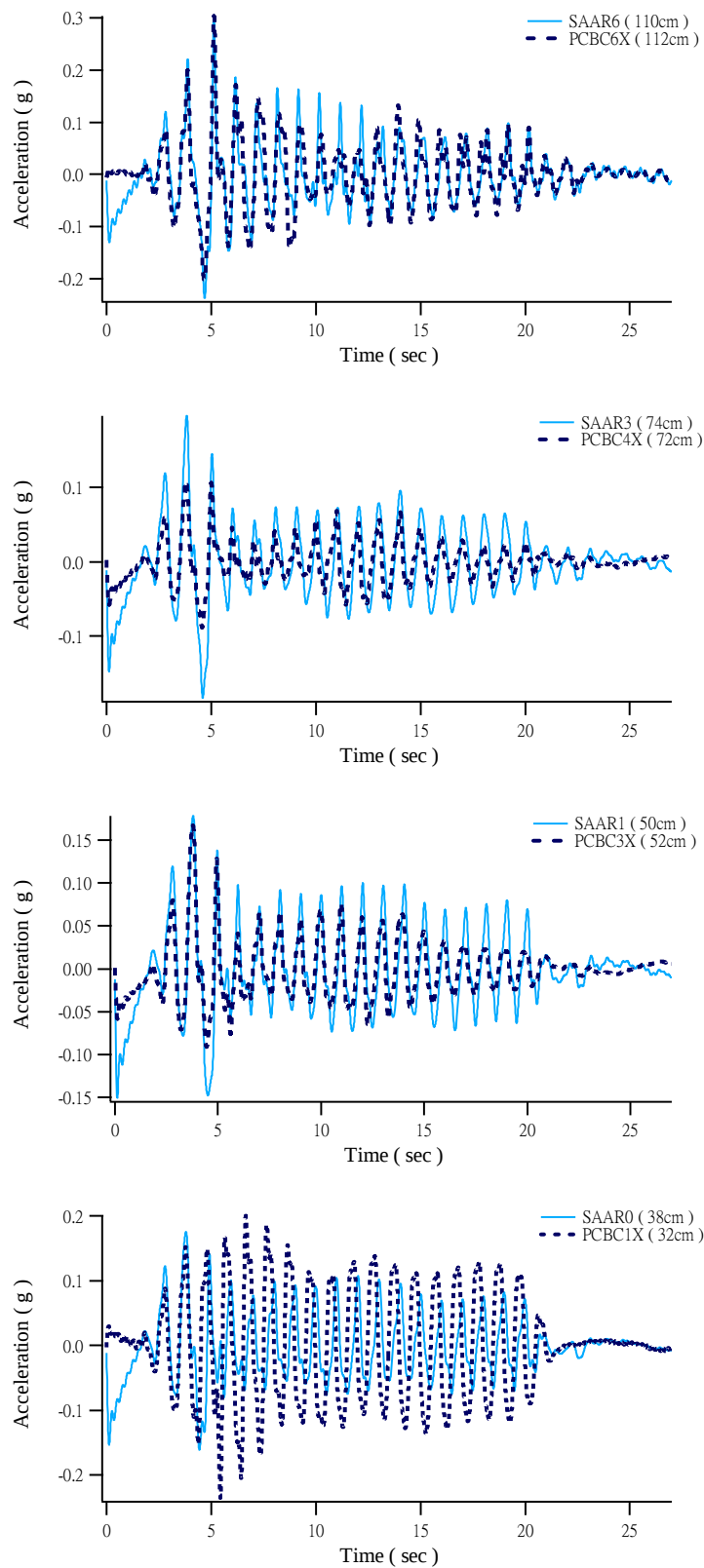


圖 2.31 Event 10 之 Shape array 與微型單向加速度計之比較

由圖 2.32 可看出，在 Event5 震動結束後主樁並未發生明顯之永久變形，而在 Event10（圖 2.33）震動結束後主樁產生極大之永久變形，在樁頂處之變位高達 28 cm，根據試驗結束後錨碇式板樁碼頭模型破壞之影像記錄（圖 2.34），樁頂亦發生極大之永久變形，代表 Shape array 之結果有一定之可信度。

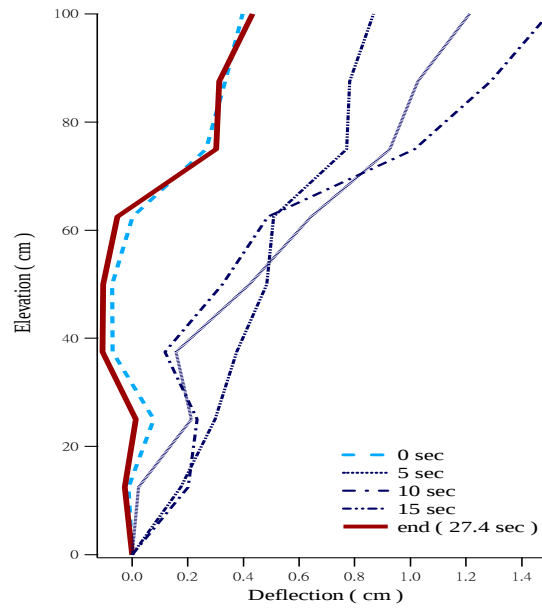


圖 2.32 Event 5 之主樁位移

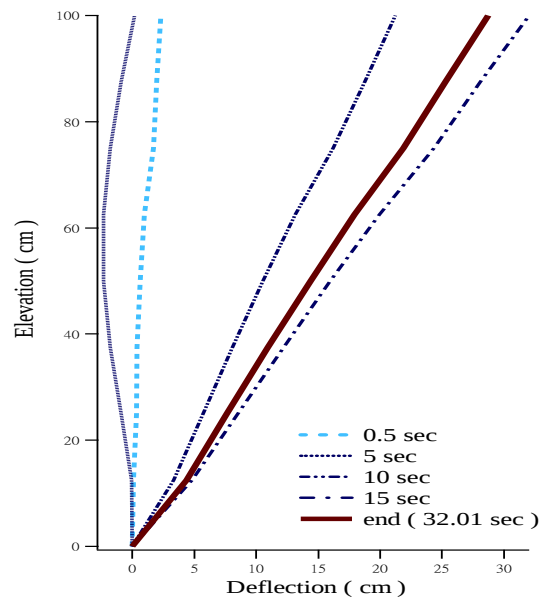


圖 2.33 Event 10 之主樁位移

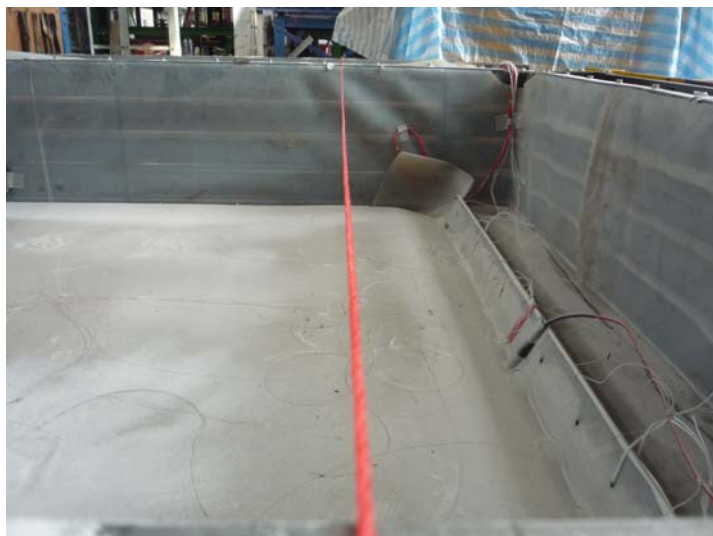


圖 2.34 錨碇式板樁碼頭模型破壞

2.5.6 應變計資料分析

本研究於主樁之面海側與回填側分別裝設有 4 個應變計，用以監測主樁在震動期間各點位之應變。監測得之資料使用低通濾波（切斷頻率 4 Hz）濾除雜訊，並將兩側相同高程之資料疊加使訊號放大。將訊號放大後之應變量應用公式 2.6 計算求得曲率 κ ，並應用公式 2.7 計算求得剪力 V 。圖 2.35 與圖 2.36 分別為 Event 5 與 Event 10 之主樁剪力分布圖。

$$\kappa = \frac{\varepsilon}{d} \dots\dots\dots (2.6)$$

式中，

κ 為該點位之曲率

ε 為該點位之應變量

d 為主樁厚度 5 mm

$$V = EI \frac{d\kappa}{dz} \dots\dots\dots (2.7)$$

式中，

V 為該點位之剪力

E 為主樁之楊氏模數 $68.9E5 \text{ N/cm}^2$

I 為主樁之轉動慣量 1.042 cm^4

$\frac{d\kappa}{dz}$ 為曲率對距離之一次微分

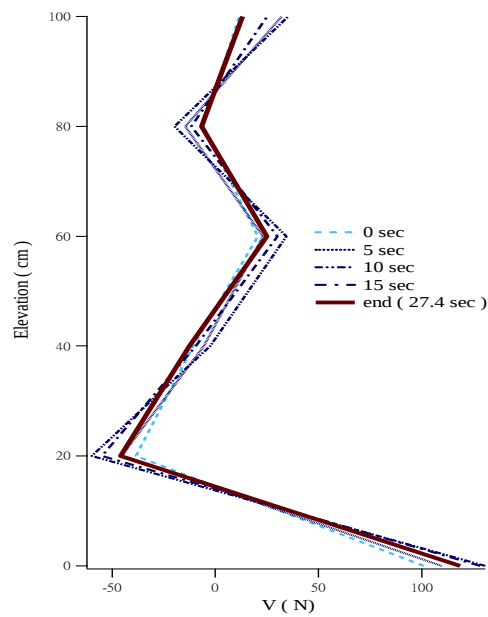


圖 2.35 Event 5 之主樁剪力分布圖

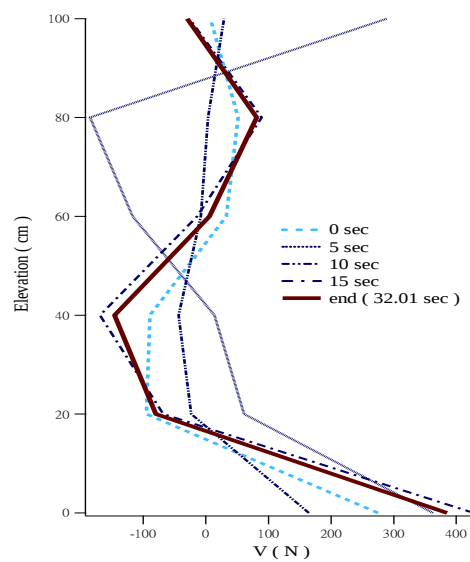


圖 2.36 Event 10 之主樁剪力分布圖

2.5.7 模型量測與極限平衡及文獻比較

較實體模型液化時板樁量測之側向應力(2.37(a)圖)、極限平衡分析假設(2.37(b)圖)、Iai and Kameoka (1993)動態數值分析(2.37(c)圖)與 Gazeta et al. (2004) (2.37(d)圖)之比較如圖 2.37 所示，結果顯示達到液化時($t=5$ sec) 時，模型之側向應力分佈與極限平衡分析之結果顯著不同，但與 Gazeta et al. (2004)之結果較接近。液化時彎距分佈比較如圖 2.38 所示，圖 2.38(a)為量測結果，圖 2.38(a)為 Iai and Kameoka (1993)動態數值分析結果，圖 2.38(a)為 Madabhushi and Zeng (2007)於離心機模型研究結果，結果顯示量測值分佈與離心機模型相近但與 Iai and Kameoka (1993)動態數值分析不同，而模型量測值與極限平衡分析因側向應力分佈不同，因此其分佈亦不同，結果顯示以極限平衡分析進行設計與實際行為有顯著不同。

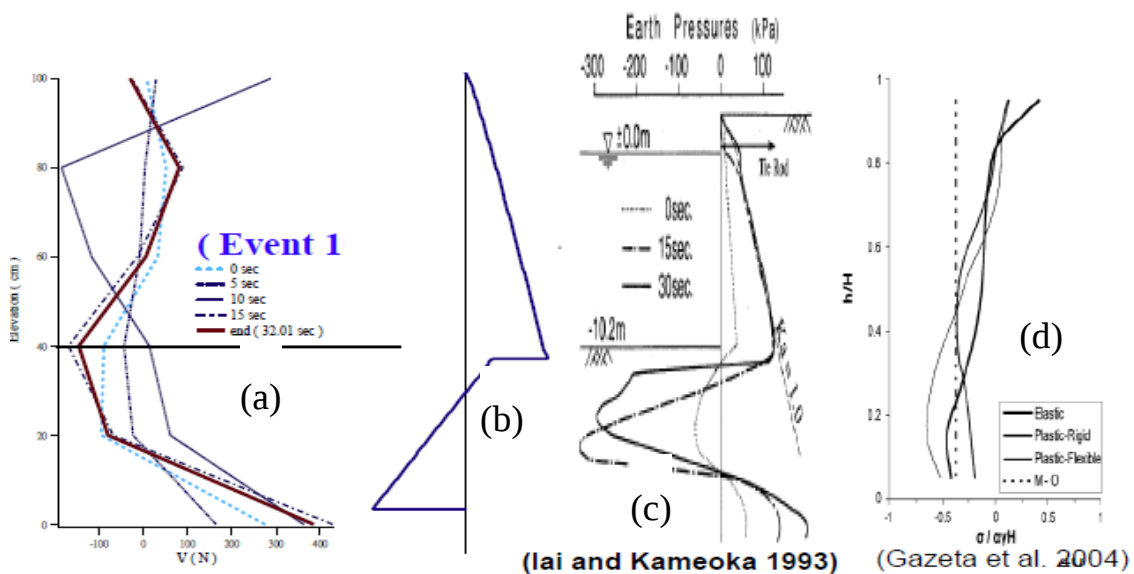


圖 2.37 液化板樁側向應力分佈比較圖

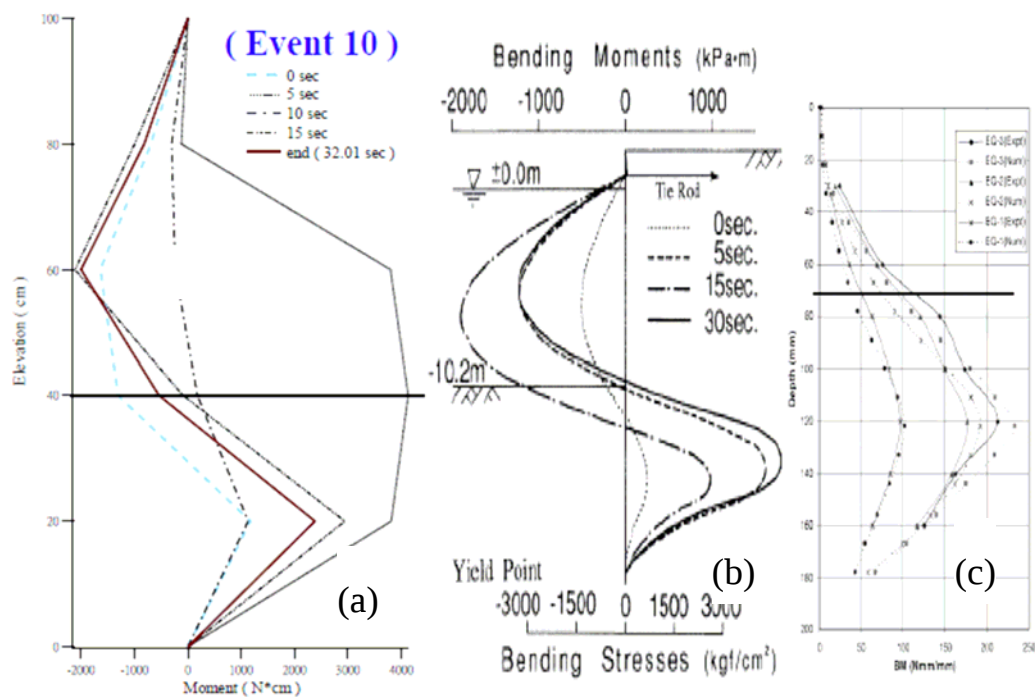


圖 2.38 液化板樁彎距分佈比較圖

第三章 震動台模型數值模擬分析

本研究之數值模擬主軸為液化土層之土壤-擋土結構動態有效應力分析，以模型試驗與數值模擬二種方法彼此間可作為規劃與驗證之用，其目的為建構可靠數值分析程序，以回饋設計修正與建立震後災損預測模式，進行土壤-擋土結構動態有效應力分析中主要元件包括適當土壤組構模式、土壤-擋土結構介面及動態邊界條件。本年度進行之數值分析主要為進行考慮試驗狀態下模型二維有效應力動態分析，以設計板樁模型並據以進行量測規劃，並以實體模型試驗資料驗證與修正數值分析結果，利用量測之土壤動態反應、孔隙水壓力激發與結構反應之結果比對，調教包括土壤動態材料參數、模型邊界條件設定及土壤-結構互制參數等輸入參數。二維錨碇板樁動態有效應力數值分析所用之分析原理、程序、相關參數及成果說明如下。

3.1 數值分析原理

3.1.1 FLAC 動態分析介紹

本計畫應用 FLAC 及其動態模組進行錨碇板樁碼頭有效應力分析，FLAC 為二維外顯(explicit)有限差分程式，其運算過程中是以「時階的形態」(time-stepping fashion) 來求解每一個節點(node)的運動方程式，利用切的很小的時階，達到節點或元素(zone)間之訊息或變化不會傳給鄰近之節點或元素之假設，因此可對將連續空間離散化之節點進行個別運算，不需如內顯(implicit)有限元素般求解聯立方程組，而在每一個時階中，利用系統原本的不平衡狀態決定每一節點的不平衡力，然後求解其運動方程式，以求得該時階下各節點的速度，節點速度決定後，將速度積分求得節點的位移及並以位移-應變矩陣計算該時階之應變增量。應變增量決定後再利用材料的組合律求得對應之應力增量，將應力增量加上原來的應力狀態，即成為新得應力狀態，並可得另一不平衡力，再進行下一時階的運算，如此反覆運算直至不平衡力趨近於零，達到平衡為止。

由於 FLAC 均採取時階運算，雖然在解一些穩態問題時因採小時階而需較長運算，但有限元素在求解非線性材料與大應變模擬時，常需進行疊代且需採用特殊解法，外顯有限差分運算因不需求解聯立方程組，所以相較而言較為簡單，另外由於外顯有限差分運算不需建立完整勁度矩陣，因此對於加入介面元素(interface element)與不同偏微分控制方程式相對簡單，因此近年已陸續加入邊界元素、結構元素及地下水滲流求解等，且其本身解的是完整的運動方程式，因此適於求解動力問題。由於進行土壤有效應力動態分析時，常需面對非線性與大應變行為，因此近年廣為應用於模擬地工材料之動態非線性行為，若結合介面元素與結構元素，可進一步模擬土壤結構互制，而導入孔隙水壓力激發模式於土壤之結構模式，可進一步進行土壤有效應力動力數值分析。

為進行動力分析，需在 FLAC 在原來靜力分析架構下增加包含阻尼效應、吸能邊界、動態邊界及孔隙水壓力激發模式之 FLAC Dynamic 額外選項，其相關功能說明如下。

1. FLAC Dynamic 介紹

進行動態分析時需考慮波傳行為在有限尺寸網格之影響，因此對應力波於網格邊界之折射與反射行為需加以考慮，且在進行模擬時需考慮到應力波傳遞時其能量消散行為，而 FLAC 的 Dynamic Option 提供了阻尼與吸能邊界，此外內含 Finn model 可模擬孔隙水壓力激發，配合其地下水模式與有效應力計算，可適切模擬土壤液化現象。Klar and Frydman (2002, 2004)以 FLAC 結合 Martin et al. (1975)之孔隙水壓力激發模式並考慮水壓消散行為進行時間域三向度液化土層－基樁動態分析，雖然分析時其土壤勁度與孔隙水壓分別考慮，但其結果顯示接近於考慮耦合反應之有效應力分析。

(1) 力學阻尼

應力波於固體材料傳遞時，其震幅會隨傳遞路徑長度增加而逐漸降低，亦即其單位體積攜帶之能量會隨傳遞距離增加而減

少，一般稱材料之吸能效應為阻尼(damping)，阻尼之來源包括應力波傳遞時因應力波擾動範圍增加而使單位體積之能量降低之幾何阻尼(geometric damping)與材料受擾動時應變吸收之能量，稱為材料阻尼(Material damping)。幾何阻尼一般較小且於一般動態模擬可自然滿足，材料阻尼(Material damping)傳統多以不具物理意義之數值阻尼模擬，彈性系統間常見以和質量或勁度相關之 Rayleigh damping 模擬，其缺點為物理意義不明顯且當材料進入非線性應力應變行為時，不易模擬。

FLAC Dynamic 提供數種可模擬材料阻尼效應之方式，除傳統 Rayleigh damping 外，增加了用於模擬壓力波傳遞之人工阻尼(artificial damping)與考慮非線性應變關係之阻滯阻尼(Hysteretic damping)，阻滯阻尼考慮類比於等值線性(linear-equivalent)之效應，考慮非線性剪應力與剪應變關係，引入 backbone curve 與 Masing rule 形成阻滯圈，由阻滯圈可計算不同剪應變下之割線剪力模數(secant shear modulus)與阻尼比(damping ratio)，因其較符合土壤之非線性動態特性，因此適合模擬土壤或岩石等高度非線性地工材料，本計畫採用 Hardin and Drenvich (1972) 所提出之剪力模數與應變震幅關係，以試誤法求取最符合室內試驗結果之參考應變(reference shear strain)。阻滯阻尼之缺點為阻尼計算時與非線性塑性應變組構模式分別獨立，因此無法完全模擬塑性應變之影響。

(2) 吸能邊界

為在有限網格下模擬半無限空間下波傳行為，網格之側向邊界需能滿足實際波傳行為，亦即需降低因邊界束制條件而產生之反射應力波並允許能量逸散，理論上採用較大的邊界距離時，其幾何阻尼與材料阻尼可以吸收大部份的波，使傳達至邊界之應力波震幅很小，使反射能量誤差較小。但實際進行數值模擬時，因網格區域有限，在靜態分析時，網格延伸範圍可依模擬精度配合數值測試決定其主要影響範圍，但進行動態分析時，應力波傳

遞之範圍遠較靜力分析為大，雖然幾何阻尼效應會造成應力波震幅衰減，但其影響仍較靜力分析為大，當應力波接觸數值模型邊界時，會造成反射現象，此與現地大範圍有所不同，而使分析造成誤差。

為使數值模型可符合動力行為，需於人為之數值邊界施加可消除應力波反射效應之邊界，一般多以黏滯邊界模擬，FLAC 中採用 Lysmer and Kuhlemeyer 所提出的黏滯性邊界條件，在邊界的正向與切向上加上阻尼盤(dashpot)，吸收傳至邊界之能量而不產生反射，稱為安靜邊界(quiet boundary)，此外分析土壤與結構互制行為問題時，所模擬區域平面與平面向外方向(即 Z 方向)均會產生消能效應。平面上能量散射可由黏滯邊界條件吸收，FLAC 程式在平面向外方向採用 Lysmer(1975)所建議之 3-D 阻尼，其物理模型為可吸收平面向外方向能量之黏滯阻尼盤(viscous dashpot)。

整合動態荷重與無限空間波傳邊界，可進行自由場動態分析，其數值模型如圖 3.1 所示，側向以黏滯邊界模擬，底部依其與網格土壤之相對勁度差異分為柔性基底(flexible base)或剛性基底(rigid base)，當網格底部之材料與下方勁度差異不大時，需以柔性基底模擬，亦即需允許應力波傳遞至下方而非反射回網格，因此需於底部增加黏滯邊界，而剛性基底則以固定邊界模擬即可，FLAC Dynamic 中另提供可模擬垂直側向邊界之邊界條件稱為自由場邊界(free-field boundaries)，其主要為自動施加黏滯邊界於兩側邊界節點。

a. 動態邊界條件

進行動態分析時需輸入適當之動態邊界條件，主要為施加可隨時間改變之荷重或格點運動量，FLAC Dynamic 所提供之動態輸入邊界包括作用於網格表面之應力或壓力歷時及作用於節點之荷重、速度或加速度歷時等，速度或加速度歷時一般多用於模

擬自底部岩盤向上傳遞之地震波，對於底部為黏滯邊界之柔性基底，因速度或加速度邊界會使黏滯邊界無法運算，因此需轉換為應力邊界，其轉換公式為：

$$\sigma = 2(\rho V) \dot{u} \dots\dots\dots (3.1)$$

式中： σ =作用於底部之應力， ρ =底部元素之總體密度， V =底部元素之體波波速， $\dot{u}$ =垂直或平行於波傳方向之質點速度，以剪力波為例，此公式推導為作用於土壤之應力為：

$$\tau = G\gamma = (\rho V_s^2) \left(\frac{\dot{u}}{V_s} \right) = (\rho V_s) \dot{u} \dots\dots\dots (3.2)$$

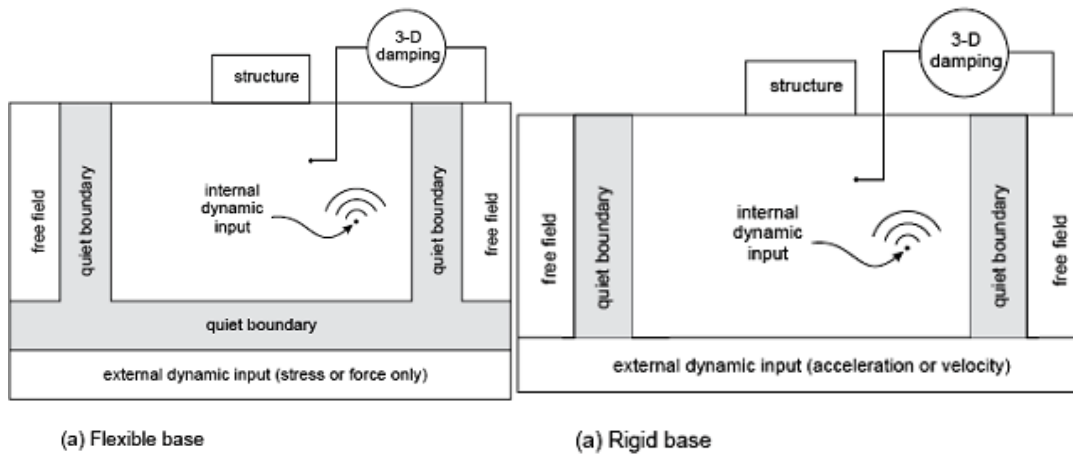


圖 3.1 考慮動態荷重之自由場物理模型圖

式中 V_s 為底部土壤之剪力波速，但底部黏滯邊界之原理為施加一與入射波反向之剪力以抵銷入射波之效應，其大小以為以質點速度與式(3.2)計算，為使應力波可向上傳遞，因此需將黏滯邊界應力加在原有動態應力，因此向上傳遞之剪力波可以下式施加：

$$\tau = 2(\rho V_s) \dot{u} \dots\dots\dots (3.3)$$

計算前需將加速度歷時以數值積分求得速度歷時，且為確保計算結束時速度為零，需進行基線修正，將數值積分之最後偏移速度消除。

由於臨海擋土結構一側受土壤側向土壓力，另一側受水壓，地震時需將兩側之側向壓力差列入考慮。考慮水下結構物(submerged structure)之動態水壓力之影響實務上均假設流體為不可壓縮且無黏滯與旋轉運動，忽略波浪效應並假設結構物不動下以增加部分流體之質量(virtual mass)於結構物上之方式，使其產生等值之動態效應方式，所增加之 virtual mass 約等於以面水側高度為直徑之圓柱體積之液體，其結果為產生隨深度變化之非線性水壓力分佈(Newmark and Rosenblueth (1971))。但其準確度受結構物勁度與幾何形狀影響，且需將增加之 virtual mass 動態效應於時間域計算中施加於受影響元素範圍並不確定。此一方式於類似基樁之四面為海水所包覆之結構較為適合，因其不同方向震動之效應相同，但以板樁此類結構兩面介質不同之系統，其包圍介質之土壓力與水壓力效應並不相同，以相同之 added mass 概念並不適合。

另一種方式為以簡化之 Westergaard(1931) 動態水壓力形式(ΔU_i) 施加於面海側之邊界，動態水壓力其大小為：

$$\Delta U_i = \frac{7}{12} h^2 \gamma_w k_h \dots\dots\dots (3.4)$$

式中 h 為水深， γ_w 為水單位重， k_h 為水平地震係數，依 Matsuo and O'hara (1960) 之研究得出牆後之動態水壓力為純水之 70%，因此作用於牆面之淨動態水壓為：

$$\Delta U_i = \frac{7}{40} h^2 \gamma_w k_h \dots\dots\dots (3.5)$$

整合於時域(time domain)數值分析時，以海床加速度為水平地震係數，以與振動方向相同之壓力邊界形式施加於面海側進行模擬，本研究以此概念進行分析，定量評估水壓對錨碇板樁碼頭之影響。結果顯示其於板樁彎距大小之差異小於 10%，且其效應為增加板樁之穩定，但由於過於簡化其準確度仍有待驗證。

b. 孔隙水壓力激發模式

進行動態荷重下土壤液化行為之有效應力分析時，除考慮土壤之非線性應力-應變行為外，亦需將因應變造成之超額孔隙水壓力列入考量，目前僅有少數超額孔隙水壓力激發模式提出，其中以 Finn et al. (1977) 所提出之模式模擬較為常見，Finn et al. (1977) 將非線性勁度變化與孔隙水壓力分開考量，利用 Martin et al (1975) 所建立之飽和砂土受排水反覆荷重之體積減小量，和不排水試驗之孔隙水壓上升的關係，建立剪力模數、剪力強度、累積體積應變和有效應力變化的關係，常稱為 Finn-Martin model，引用 Finn-Martin model 時需四個參數，Byrne (1991) 提出簡化之 Martin 公式，其累積體積應變與剪應變之關係可以下式表示：

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vd}}{\gamma} = C_1 \exp(-C_2 (\frac{\varepsilon_{vd}}{\gamma})) \dots\dots\dots (3.6)$$

其他計算與 Finn-Martin model 相同，稱為 Finn and Byrne Model，此公式僅需 2 個參數，且 C_1 可由相對密度或修正之 SPT-N 值求得：

$$C_1 = 8.7(N_1)_{60}^{-1.25} \dots\dots\dots (3.7)$$

而 C_2 則可以下式計算：

$$C_2 = \frac{0.4}{C_1} \dots\dots\dots (3.8)$$

FLAC 內建 Finn and Byrne Model，所需之孔隙水壓力激發模式參數將以現地 SPT 試驗結果估算，非線性應力與應變關係則以 Mohr -Coulomb 模式模擬並加入滲流影響，可進行近似於有效應力分析之模擬。

3.1.2 分析程序

進行動態有效應力數值模擬程序包括：1) 建立網格；2) 設定材料

彈性與塑性強度參數；3) 設定靜態邊界條件並進行重力力學平衡計算；4) 施加靜水壓力或滲流應力於網格內部與邊界；5) 靜態系統力學平衡；6) 將液化土層以 Finn 模式模擬；7) 給予阻尼參數和吸能邊界條件；8) 施加動態邊界條件。

分析時之其主要考量可整合為包括：(1)地層幾何模型建立、(2)分層土壤組構行為模擬以及(3)動態荷重與邊界條件三部分，各部分說明如下：

1. 地層幾何模型建立

進行動態分析時其網格除需考慮靜態分析時之特性外，其網格大小(空間切割)與時間切割之單位需額外考慮波傳行為之影響，且其側向與下方延伸範圍與邊界條件亦需考慮應力波在固定邊界之反射現象，以模擬應力波於半無限空間傳遞之行為。網格之尺寸需滿足波傳方向(垂直向)之最大網格長度小於應力波最小波長之 1/10 為原則，若輸入之動態邊界其含有較高頻率(短波長)之成分，在不影響分析精度下需先進行濾波處理，將高於網格限制之頻寬部分移除，網格尺寸可模擬之最高頻率(f_u)可以下式計算：

$$f_u = \frac{V}{10 \times L} \dots\dots\dots (3.9)$$

式中 V =應力波波速， L =平行波傳方向之最大網格長度。

進行動態分析前之數值模型需符合靜態穩定條件，靜態穩定包含力學平衡與地下水穩定，為滿足力學平衡與計算震動前初始狀態，需於網格邊界施加適當邊界條件，而地下水之影響亦需施加水壓力邊界條件，靜態分析之邊界條件包括：(1) 底部邊界節點於水平與垂直向固定，(2) 二邊側向則假設側向邊界節點水平向固定，(3) 水壓力可依現地水位狀況模擬，並於 FLAC 中啟動滲流分析計算網格內部穩態水壓力分佈。

為配合自由場邊界應用，網格兩側節點需滿足垂直配置，側向

延伸範圍需滿足靜態分析時之尺寸要求，其原則為須將潛在破壞面完全包圍，垂直向需儘量涵蓋影響土層，模擬層狀地盤時需依現地鑽探之地質剖面進行適度簡化分層，此外網格劃分時，儘可能於現地監測系統位置附近有節點或元素，以便後續比較驗證。

2. 分層土壤力學組構行為模擬

網格中每一元素均需指定其材料參數，進行有效應力動態分析之參數包括彈性參數、塑性參數、滲流參數及孔隙水壓力激發模式參數，彈性參數可由震測試驗之波速求得，需有二個彈性力學參數，FLAC 中可以體積模數配合剪力模數或者楊氏模數加柏松比輸入；塑性材料參數依選用模數不同而不同，因 FLAC 中之 Finn model 僅能用於 Mohr-Coulomb 模式，因此需要 Mohr-Coulomb 塑性參數，包括摩擦角、膨脹角、凝聚力、張力強度等；為進行滲流分析，需輸入土壤之滲透係數(permeability)與水之體積模數，此外為進行重力計算，需輸入土壤密度。

進行動態載重下液化行為有效應力分析時，除考慮應力應變行為外，亦需將因應變造成之孔隙水壓力列入考量，以 FLAC 內建之 Finn and Byrne Model 分析，將非線性勁度變化與孔隙水壓力分開考量，所需之孔隙水壓力激發模式參數初期以 SPT 之 N 值估算，非線性應力與應變關係則以 Mohr-Coulomb 模式模擬並加入滲流影響。

為考慮動態分析時之幾何阻尼效應與數值穩定，需以人為方式施加阻尼，常以 Rayleigh damping 形式施加。然而，在以彈-塑性行為做為組成率的分析模式中，例如莫耳-庫倫塑性模式(Mohr-Coulomb Plasticity Model)，多數之能量消散會在呈現塑性流(Plastic Flow) 期間發生，並且會隨著剪應力或剪應變震幅的增加而增加，因此本計畫以考慮非線性應力應變關係中之切線勁度(tangent stiffness)，Masing rule 模擬應力大小改變之阻滯阻尼(Hysteretic damping)，並以 Hardin 公式中之 reference strain 定義阻滯，模擬阻尼效應，另結構物其阻尼則以 5% 之勁度阻尼模擬。

3. 動態荷重與邊界條件

為模擬半無限空間波傳行為，分析時需於側向施加自由場邊界，底部則以可消除垂直與水平向震動之消能邊界模擬。動態荷重包括地震波與地表載重，地表荷重可以荷重形式施加於節點或以應力形式施加於邊界元素表面，但動態運動邊界(如位移、速度或加速度)之施加需將其轉換為作用於格點之邊界條件，本研究中因網格底部為柔性底層，為配合底部消能邊界使用，將加速度歷時積分後成為速度歷時，再以 $\tau_{xy} = 2(\rho V_s) \dot{u}$ ，(ρ = 底部土壤總體密度， V_s 為土壤剪力波速， $\dot{u}$ 為底部土壤質點水平速度)，將加速度歷時轉換為剪應力歷時施加於網格底部元素，進行自由場地震模擬；對地表動態載重則另外增加埋置於地表之剛性基礎並將荷重施加於剛性基礎元素之節點。

3.2 錨碇板樁碼頭模型有效應力動態數值分析

為進行振動台錨碇板樁碼頭有效應力動態數值分析，在可液化土層網格中加入樑與基樁二種結構元素，模擬考慮液化之錨碇板樁式碼頭動態有效應力分析，所用參數依 NCREE 在均勻乾淨砂之結果設定。分析時以模型之條件進行，詳細說明與初步結果如下。

3.2.1 分析原理與程序

1. 分析原理

液化土壤—板樁結構系統之動態行為實際上為耦合反應(coupled response)，即經由土壤傳播之地震波會造成板樁與上部結構震動，且上部結構之震動亦會影響下方土壤之動態行為，分析液化土層之板樁系統時更需將因孔隙水壓激發造成之地震波傳遞影響及液化土層側向位移一併考量，但其物理模式複雜，為簡化分析，實務上多採將土壤動態反應與板樁—上部結構個別分析之非耦合分析(decoupled analysis)，並以動態 Winkler 系統模擬土壤—板樁之互制行為。

非耦合分析物理模型為將板樁視為埋置土中之樑，周圍土壤以 Winkler 彈簧模擬土壤勁度並以並聯或串聯之 dashpot 模型模擬土壤阻尼(damping)效應，本研究以 FLAC 中之基樁元素(pile element)模擬土中板樁，加上以鋼索元素(cable element) 模擬錨碇鋼纜，結合成錨碇式板樁碼頭系統，結合 Martin et al. (1975)之孔隙水壓力激發模式並考慮水壓消散行為進行時間域三向度錨碇式板樁動態分析，模擬錨碇板樁碼頭之動態反應。

2. 結構元素

本研究之板樁碼頭主要由基樁元素及鋼索元素組成，基樁元素為二維元素，可傳遞正向力、剪力及彎矩至接觸之土壤，基樁本身限制其軸向降服行為，但可指定其節點形成塑性鉸，模擬彎矩破壞，其與周圍土壤之互動以介面元素傳遞，介面元素本身具備正向與剪向彈簧，並可指定其彈簧行為，此介面特性可用以模擬土壤結構互制行為，而周圍土壤則以自由場中之土壤元素模擬。鋼索元素為單一自由度元素，僅可承受軸向應力，與周圍土壤不產生互制反應，但可與結構元素於節點連結。

3. 土壤-結構介面

模擬近場(near field) 反應一般多以 Winkler model 為主，Boulanger et al. (1999)引入近似於 p-y 曲線之概念，以非線性動態 p-y 元素模擬土壤－基樁互制行為，稱為 BNWF(Beam on Nonlinear Winkler Foundation)模式，並整合於於時間域(time domain)二維動態有限元素分析中用於預測離心機基樁動態試驗結果，由於 BNWF 之參數不易求得，因此本研究以考慮正向(normal)與剪向(shear)線性 Winkler 彈簧，並導入 Mohr Coulomb 之破壞機制，模擬土壤與結構元素介面行為，稱為 Mohr- Coulomb 介面彈簧模式，以進行時間域二維動態數值分析。

4. 邊界條件

進行動態分析時需輸入適當之動態邊界條件，可以隨時間改變

之荷重或格點運動量施加，FLAC Dynamic 所提供之動態輸入邊界包括作用於網格表面之應力或壓力歷時及作用於節點之荷重、速度或加速度歷時等，速度或加速度歷時一般多用於模擬自底部岩盤向上傳遞之地震波，振動台剪力盒底部與振動台連結，因此底部為剛性基礎，而剪力盒可視為自由場，因此模型兩側設定為黏滯邊界，以模擬兩側無限延伸之自由場。

3.2.2 數值分析模型

1. 碼頭模型配置

振動台錨碇板樁碼頭斷面如圖 3.2 所示，碼頭面海側為厚度 5 mm 以鋁板製作之板樁，長度為 100 cm，懸臂部分與海床深度相同為 60 cm，因此貫入深度為 40 cm。陸側之錨碇樁為直徑 2 cm 之實心鋁樁，間距為 0.3 m，長度為 50 cm，錨碇鋼纜為直徑 2 mm 之鋼索並與板樁及錨碇樁於地表下 12 cm 深度連結，碼頭上方無載重施加於地表。

雖然模型為以乾淨砂配合實降方式準備，因此土層為均勻堆積，但考慮應力變化及水中實降距離差異，因此將土壤分層分為四層，底層為彈性層，其剪力波速為 100 m/s，上方土層為可激發孔隙水壓力之 Finn model 土層，波速由下而上分別為 95、90 及 85 m/s，除彈性層外，所有土層之強度參數為 $c=0$ 及 $\phi=30^\circ$ ，土壤密度為 $1,900 \text{ kg/m}^3$ ，每一網格大小為 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 。

2. 數值分析模型

本案例分析主要包括二個階段，分別為現有系統靜態穩定分析及動態有效應力分析，依此二階段規劃之數值模擬共分七個步驟：1) 土壤網格及結構元素建立；2) 靜態分析材料強度參數指定並重力平衡；3) 設定靜態與水壓邊界條件；4) 使用 Finn 模式於可能液化土壤；5) 給定阻尼參數、動態邊界條件及動態水壓力；6) 規劃監測點並施加地震力。分別敘述如下：

本案例所建立之網格乃依照模型碼頭的設計斷面，建立一寬度 182 cm，高 132 cm 之範圍，海水位於高程 132 m，且不考慮水波之影響，將海床可分成四層，底部海床(LB)為高程 0 cm 至 12 cm，為 SP 土壤，設定為彈性土層且不考慮液化；頂部海床(LT)為高程 12cm 至 72 cm，其 $(N_1)_{60}$ 約為 7，屬於 SP 土壤，考慮液化；碼頭開挖面位於高程 72 cm 深度，高程 72 cm 至 100cm 為下層回填砂層(BB)，屬 SP 類土壤，其 $(N_1)_{60}$ 約為 6 並可能液化；高程 100 cm 至 132 cm 為上層回填砂層(BT)，屬 SP 類土壤，其 $(N_1)_{60}$ 約為 5 並可能液化，各土層材料參數如表 3-1 所列。

以指定上下結構元素節點方式並配合自動分割方式產生板樁元素，板樁以基樁元素模擬，並將間距設為零，以模擬連續之板樁，鋼索元素則將其兩端點固定於相同高程(ELE=120 cm)之面海側板樁與錨碇板樁之節點，所有結構元素之長度均為 4 cm 以與土壤元素節點連結，板樁上下兩端點均與土壤連結，使基樁位移與周圍土壤相同，且自動形成鉸接(hinge)端點。各結構元素之參數如表 3-2 所列，基樁元素中與土壤連結之介面元素以符合 Mohr-Columb 行為之介面彈簧參數模擬，介面彈簧參數如表 3-3 所列，結構元素建立後之網格如圖 3.2 所示。

為進行考慮水壓之靜力平衡，所設之邊界條件為左右兩側為水平向固定之 roller，底部為垂直向固定之 roller，靜態時考慮靜水壓力分佈，土中孔隙水壓力以線性分佈隨深度增加而線性增加，面海側另考慮相對於碼頭深度之水壓施加於碼頭底部，板樁上則施加線性增加之水壓，另用所建網格及邊界條件得到之靜力平衡下垂直有效應力分佈與結構元素彎距分佈如圖 3.3 所示，最大彎距於面海板樁發生於海床下 16 cm(高程 56 cm)，大小為 33.7 N-m，錨碇板樁最大彎距為 4.59 N-m，位置為錨碇位置下方 20 cm(高程 100 cm)，錨碇鋼索受力為 61.7 N。

進行動態分析時，可液化土層其 Finn 模式之參數如表 3-1 所列，結構元素以 Rayleigh 阻尼設為質量之 5%，最小共振主頻為 30 Hz，

土壤則以 Hardin 型態之遲滯阻尼，參數如表 3-1 所列，以 free field 邊界指定作用於左右兩側，底部由於為岩盤，為消除由自由面反射之壓力波之於底部造成反射現象，底部以垂直向啟動之安定邊界 (Quiet Boundary) 設定。另地震力以頻率 1 Hz 震幅為 0.20 g 之水平向正弦波加速度施加於底部。

表 3-1 動態分析土層參數表

土層	LB	LT	BB	BT
Elevation from bottom(cm)	0~12	12~72	72~100	100~132
USCS	SP	SP	SP	SP
$N_{1,60}$	--	7	6	5
Density (kg/m^3)	1900	1900	1900	1950
Shear Modulus (MPa)	19	17.2	15.4	13.7
Bulk Modulus (MPa)	41.2	37.2	33.4	29.7
Cohesion (Pa)	--	0	0	0
Friction angle (deg)	--	30	30	30
Dilation angle (deg)	0	0	0	0
Hardin r_{ef}	--	0.08	0.08	0.08
Finn Parameter C1	--	0.76	0.93	1.16
Finn Parameter C2	--	0.52	0.43	0.34

LB:底部海床, LT:頂部海床, BB:下層回填砂層, BT:上層回填砂層

表 3-2 結構元素參數表

	Elastic Modulus (GPa)	Moment of Inertia (m^4)	Cross Sect. Area (m^2)	Mass Density (kg/m^3)	Pile Perimeter (m)
Sheet Pile	68.9	1.04×10^{-8}	0.005	2710	2.0
Anchored pile	68.9	7.85×10^{-8}	3.14×10^{-4}	2710	0.06
Cable	210	--	1.26×10^{-5}	7850	--

表 3-3 基樁元素中之 Mohr-Coulomb 介面彈簧參數表

	Normal Stiffness (MN/m)	Shear Stiffness (MN/m)	Normal Coh. (N/m)	Shear Coh. (N/m)	Normal Friction (deg)	Shear Friction (deg)
All layers	4.3	4.3	1,000	1,000	30	30

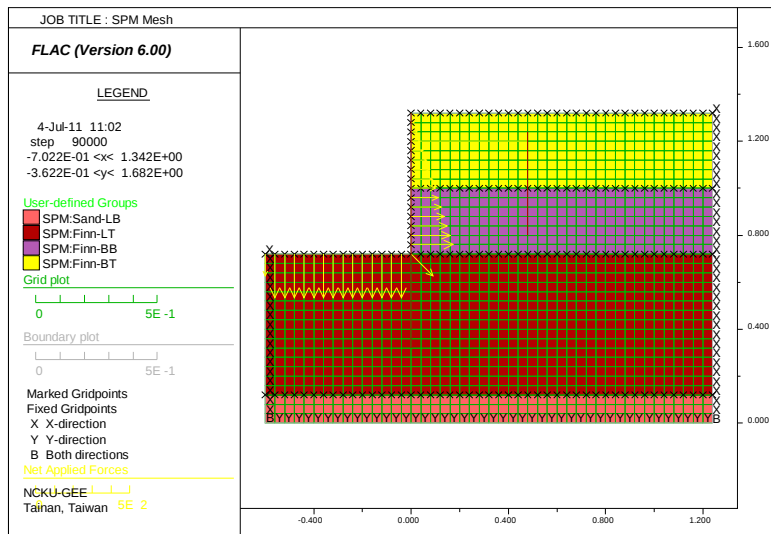


圖 3.2 錨碇式板樁數值模型

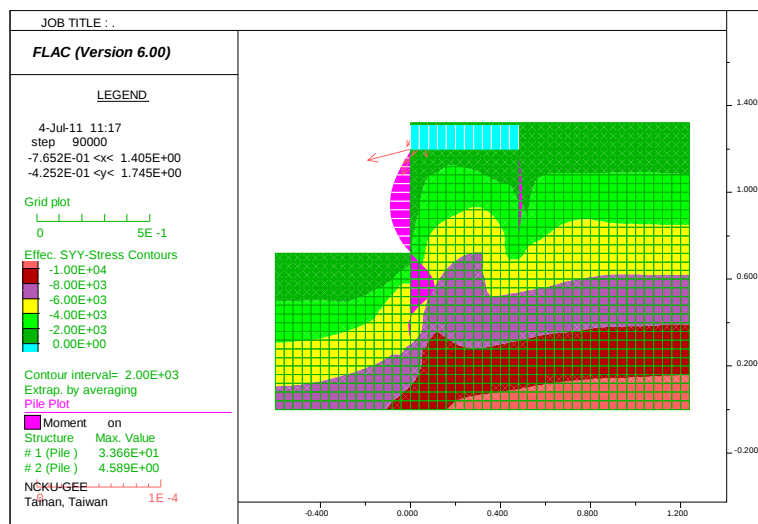


圖 3.3 錨碇式板樁靜力平衡垂直有效應力、結構彎矩與錨碇力

3.2.3 板樁模型數值分析結果

1. 動態邊界與監測點

本研究以超額孔隙水壓力、超額孔隙水壓比、基樁彎矩與號碼頭前端位移量、土壤加速度等，以正弦波形式之固定頻率及震幅之加速度施加於底部，並於兩側以自由場黏滯邊界降低兩側回彈之應力波，以模擬層狀剪力盒行為；此外，動態水壓力則以 Westergaard

形式施加於板樁表面，依分析目的規劃監測點位，紀錄其時間變化量，監測點位與進行動態分析前之網格與邊界如圖 3.4 所示。

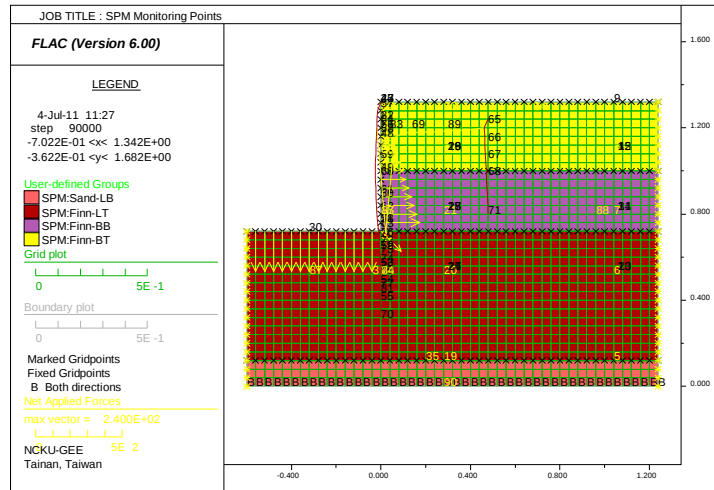


圖 3.4 監測點位與動態邊界

2. 加速度位移與孔隙水壓力歷時變化

考慮在板樁後方自由場模型底部(高程 0 cm)與地表(高程 132 cm)之加速度變化如圖 3.5 所示，除少數突出點外，地表最大水平加速度約為 0.20 g，且底部之加速度較地表為小，顯示其地表加速度無顯著放大現象；不同深度孔隙水壓力變化如圖 3.6 所示，顯示板樁後方土層已接近初始液化狀態。

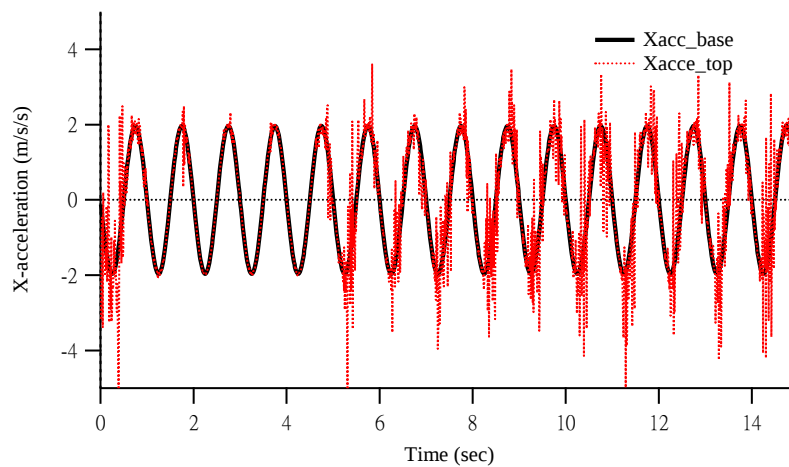


圖 3.5 加速度歷時變化

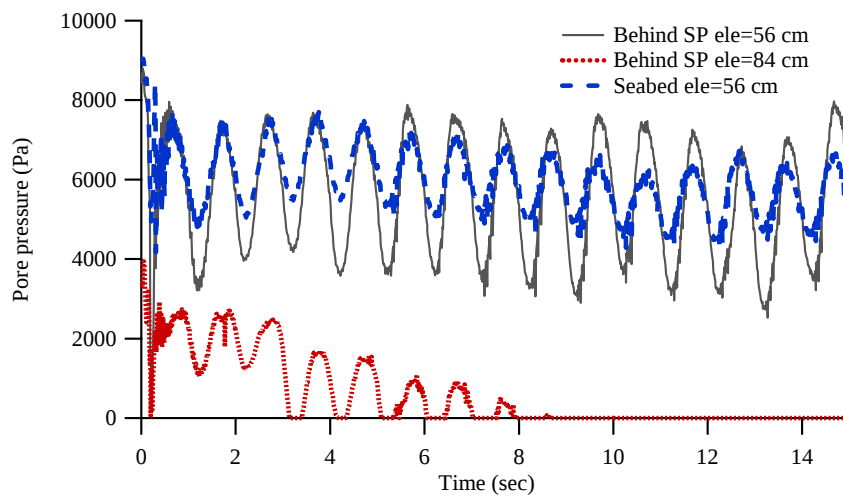


圖 3.6 孔隙水壓力歷時變化

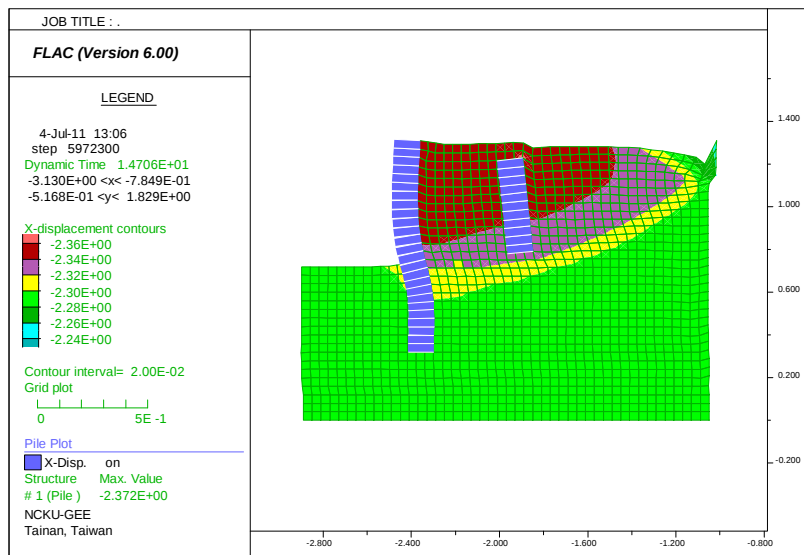


圖 3.7 t=15 sec 時板樁系統位移分布圖

由於板樁其破壞常由碼頭位移量控制，分析結束時(t=15 sec)時板樁系統變位分布如圖 3.7 所示，分析結果顯示板樁最大水平位移發生於樁頂附近，樁頂與樁底相對位移歷時如圖 3.8 所示，最大相對位移為 2.3 cm。

3. 土壤結構互制

土壤結構互制反應可由其有效應力變化與結構反應觀察，圖 3.9

為在 15 sec(15 cycle)時土壤位移量分佈與結構元素之水平位移量分佈，面海板樁最大相對位移發生於樁頂，錨碇基樁無顯著相對位移；較大之土壤位移發生於兩板樁間之土壤，最大土壤垂直位移發生於錨碇板樁與表層土壤交界處，顯示板樁變位之主因為受周圍土壤變位影響。

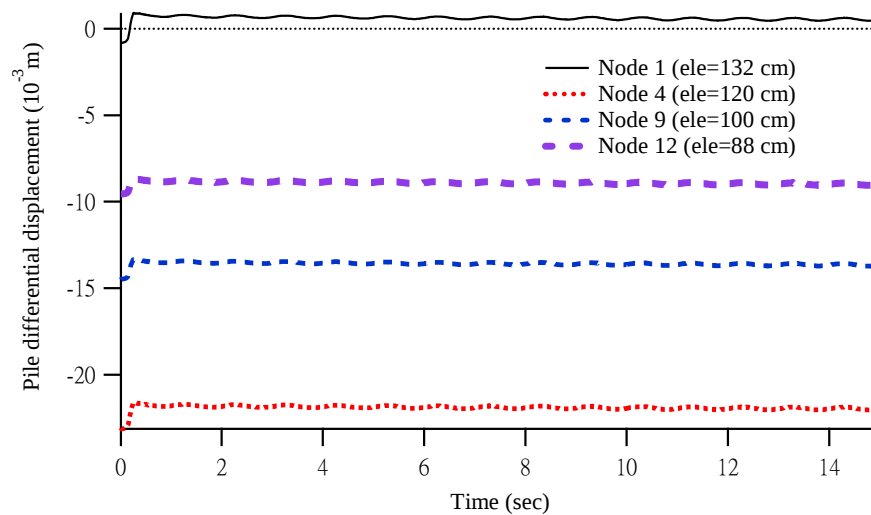


圖 3.8 板樁水平向頂底部相對位移歷時變化

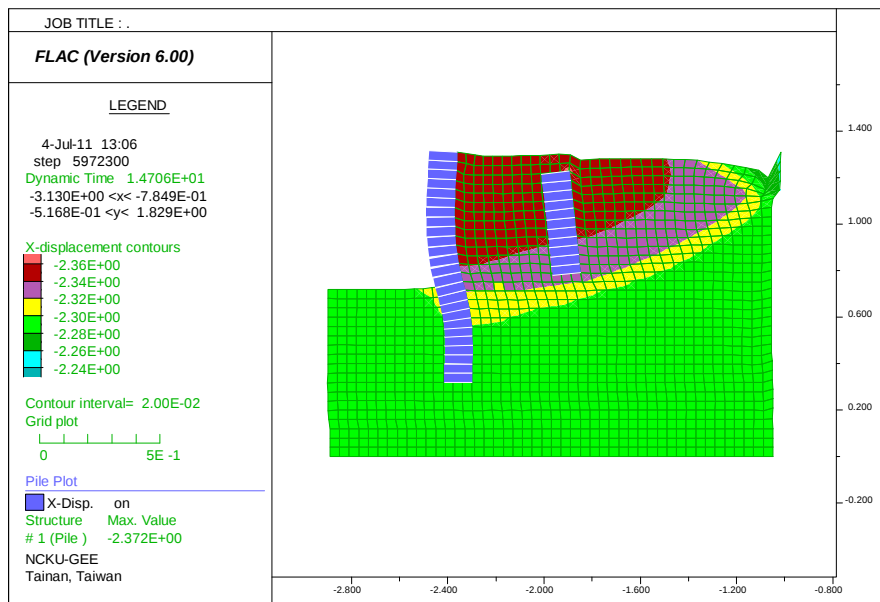


圖 3.9 板樁系統與土壤變形分佈(t=15 sec)

圖 3.10 顯示於 15 sec 時結構元素之彎距分佈與垂直有效應力分佈，在經過震動，回填砂之垂直有效應力大幅減少，其原因為孔隙水壓力激發之故，面海板樁最大彎距發生於懸臂部分中段，錨碇基樁其彎距均遠小於面海板樁之彎距值，圖 3.11 為面海板樁最大正負彎距歷時，最大負彎距產生於懸臂部分中段(高程 76 cm)，至 14 sec 時其最大正彎距為 90 N-m，除顯示其相對關係外，圖中亦顯示板樁頂彎距較靜態時(22 N-m) 增加超過 400%，最大負彎距發生於海床下方 16 cm(高程 56 cm)，其值為 40 N-m，同一高程彎距較靜態時(7 N-m) 增加接近 600 %。圖 3.12 為鋼索拉力歷時，其最大拉力為 30 N 初步分析顯示考慮孔隙水壓力激發與動力反應下，其結構荷重將大幅增加，但現有模型不致產生結構體元件破壞。

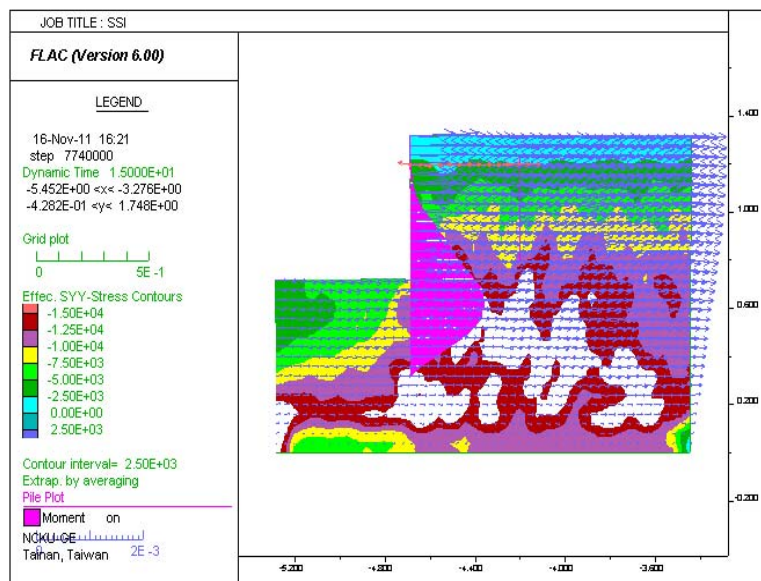


圖 3.10 板樁系統彎距與土壤垂直有效應力分佈(t=15 sec)

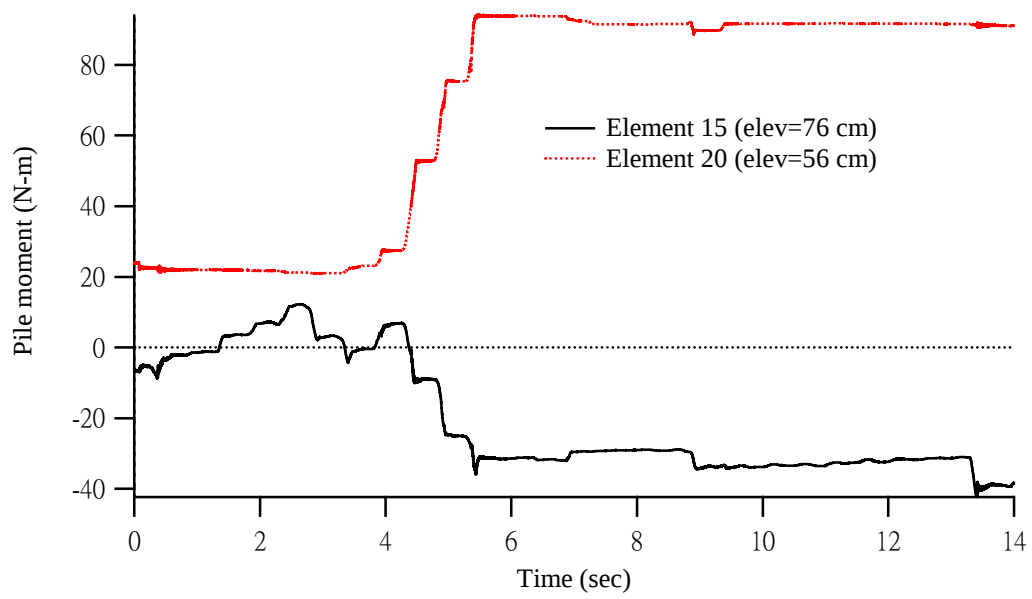


圖 3.11 板樁最大彎距歷時

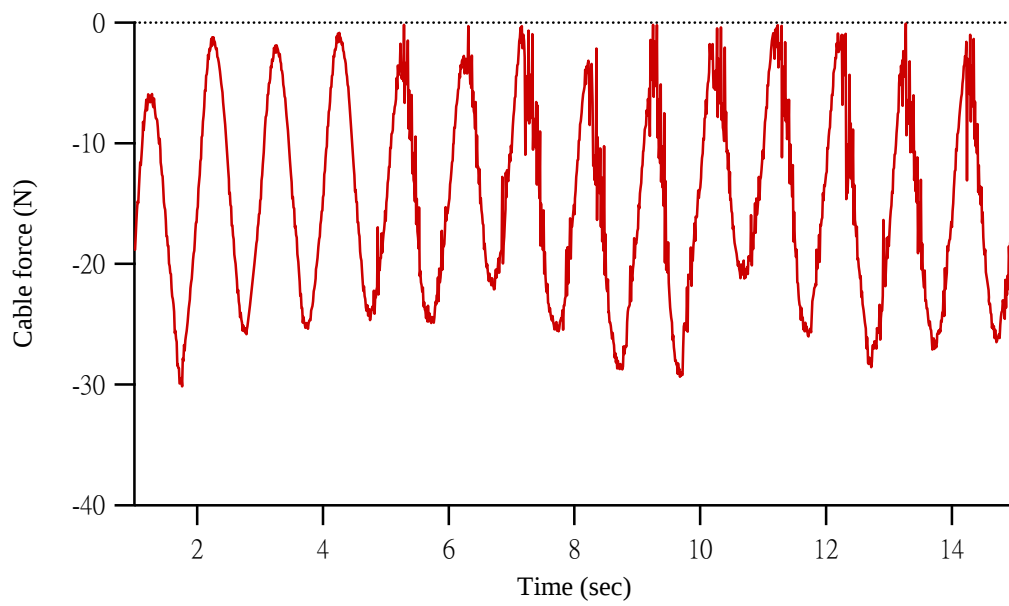


圖 3.12 鋼索拉力歷時

4. 數值分析與文獻及模型量測比較

將數值於接近液化狀況下之彎距分佈與模型試驗量測值及 Madabhushi and Zeng (2007) 於離心機模型研究結果比較如圖 3.13 所示，發現此三者之彎距分佈相近，最大彎距發生在海床深度附近，且與靜態分析之彎距分佈顯著不同，相關量化分析因受限於數值分析中土壤動態參數仍待決定而無滿意之結果，但結果顯示數值分析所模擬之破壞模式有一定之可靠度。

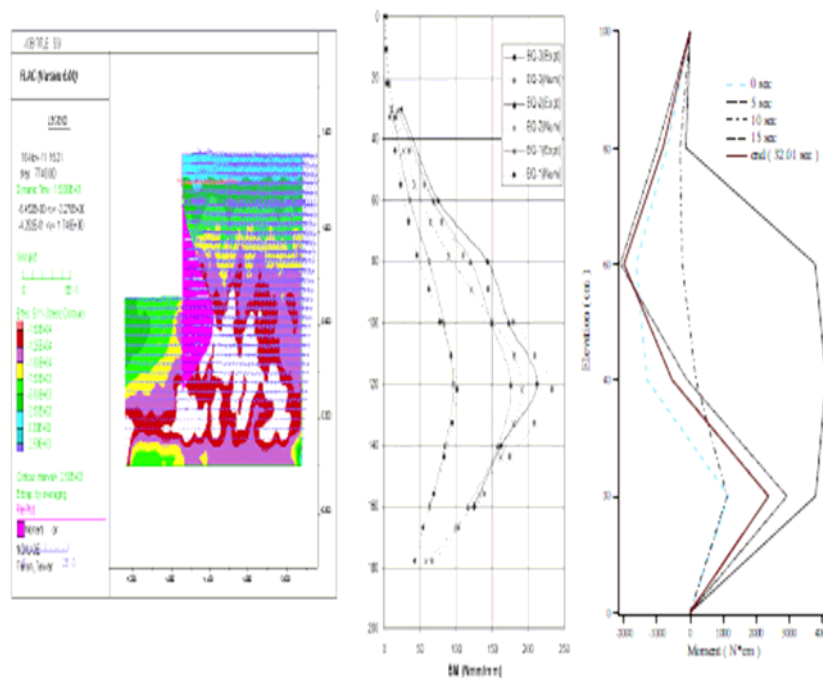


圖 3.13 數值、文獻與模型量測之彎距分佈比較

第四章 耐震功能性設計要求探討

本章針對碼頭之耐震功能性設計目標作探討，研究日本與國際航海協會功能性設計基準之功能目標的訂立方式及理念，並與國內「港灣構造物設計基準」之耐震設計目標作差異性討論，以提出適合國內設計實務的耐震功能性設計目標；其中，地震等級之建議更以本所過去對各港區的地震危害度曲線分析結果進行研究，並參考國外基準訂定之地震等級，提出適合國內碼頭設計的地震等級修正建議；另外，亦針對國內「公共工程功能性設計準則」三等級設計地震力的要求，探討在不同功能性目標下各地震等級所應對應的功能性水準。

4.1 碼頭功能性目標

從日本的港灣施設技術基準可知，日本對港灣設施的設計在地震力計算上，係利用機率法考量歷史災害，震源等因素進行地震危害度分析，進而得到地震地表歷時，此法在國內多應用於水庫設計，但由於計算方法複雜，且港灣構造物數量較多，此法對於國內港灣構造物設計應用並不實際。另外，在功能性標準規定上，日本已正式進入構造物破壞機率可靠度的要求，此類設計標準要求亦為國內工程師設計能力的另一種挑戰。為避免修訂幅度過大，因此本研究建議，國內港灣構造物耐震功能性設計可先參考 2001 年的國際航海協會港灣構造物耐震設計準則來修訂。

國際航海協會港灣構造物耐震設計準則[INA 2001]除了對構造物在等級一地震力作用下之功能提出要求以外，在等級二地震力作用下，對應第 I~II~III~IV 級功能水準之 S~A~B~C 級耐震設施，基本相當於國內基準中之「特定(S 級)、A 級、B 級與 C 級」四種類別構造物，不同之處在於：國內現行基準，目前僅籠統地要求在 475 年回歸期設計地震力下，剛性結構物不得產生滑動、傾斜以及主體與基礎承载力不足之破壞，需保持安定，非剛性結構物允許發生塑性變形，但

韌性比不超過容許韌性容量，對於在同樣等級設計地震力下，「特定(S 級)、A 級、B 級與 C 級」四種類別構造物(包括剛性與非剛性)不同之行為或功能並未如「INA 港灣構造物耐震設計準則」明確定性甚至量化，僅以不同重要度係數來修正在同等級設計地震力作用下施加於結構之等效側向力之大小，間接調整構造物之耐震功能；「INA 港灣構造物耐震設計準則」引進之功能性設計法，係根據重要度等級「特定(S 級)、A 級、B 級與 C 級」結構物在所考量之各等級設計地震力下之不同功能性水準加以定性，並以不同大小之功能性可接受標準值加以限定，較類似國內橋梁建築耐震功能性設計研究之理念。

功能性目標之建立需考量：構造物之破壞對人命安全與財產損失之直接與間接(如處理危害物品等)影響之嚴重程度、震後是否要求具有特別之使用功能、修復之難易(與碼頭之結構型式相關)、其破壞對社會活動、環境與經濟之衝擊與損害度等，而因碼頭之型式、用途、規模等直接與這些因素相關，所以不同型式、用途、規模之碼頭的功能性目標不盡相同，用途越重要、規模越大，則該碼頭之功能性設計目標可能就越高，即在同一等級地震下之功能性水準要求越高。

而不同貨種之碼頭，由於使用之裝卸方法與裝卸機具不一樣，或即使可使用某些相同之機具，但工作效率很差，通常不考量其破壞後可以由其它種類碼頭代替運作，引進功能性設計法時，除了允許碼頭結構物在較大地震作用下之破壞以外，為避免碼頭破壞後造成營運停頓，規劃港口時，也可考量在用途及貨種相同之碼頭當中，設立一定比例(考量碼頭營運作業能量與基本要求)之耐震強化碼頭特定級，即適當提高部分碼頭之功能性目標至特定級碼頭，以維持災後救援機制，因此特定級碼頭之功能性目標訂立應趨嚴謹為佳。

值得提及的是，功能性標準值的大小或功能性目標之高低，直接控制所設計結構耐震能力之強弱，設計目標越高，對應震後補強之工程費則較少，基準所訂立之功能性目標為一最低標準，所以除了滿足基準要求以外，工程師亦可根據業主之要求，考量結構物在震後所需之補強費用，以及可能導致的間接經濟損失，以綜合考量結構物整個

使用年限最低總費用，來決定結構設計所需的耐震設計功能，才能真正發揮耐震功能性設計法之精神。

4.2 地震等級、功能性水準及重要度分類

功能性目標中之定性規定包含地震等級與功能性水準，本節將針對碼頭設計之地震等級與功能性水準作說明及探討，另外，碼頭重要度分類亦關係到功能性目標之訂立，因此本節亦一併針對碼頭四種重要度分類作說明。

4.2.1 地震等級

地震力等級之劃分可以經由一定年限內發生地震之超越機率(Exceedance Probability)或相當之回歸期表示，地震力回歸期與超越機率之關係式如下。

$$P_R = \frac{1}{1 - e^{0.02 \ln(1 - P_{E50})}}$$

其中， P_R 為回歸期， P_{E50} 為 50 年內之超越機率，例如：50 年內超越機率為 50%(表示為 50%50)，約相當於回歸期 72 年(或約 75 年)；超越機率 10%50，約相當於回歸期 475 年。

國內「公共工程功能性設計準則」中建議設計地震力必須考量三等級地震力，而國內建築、橋梁耐震功能性設計規範草案亦皆定義三等級設計地震，然而「INA 港灣構造物耐震設計準則」僅以兩等級地震進行設計，但為符合國內耐震功能性設計架構之一致性及國內工程師之設計習慣，因而建議維持 2500 年回歸期地震(50 年超越機率 2%)作為最大設計地震考量。

而目前國內「港灣構造物設計基準」之設計地震力是參照 2005 年版「建築耐震設計規範」，同為三等級設計地震力如表 4-1 所示，提供 30 年回歸期中度地震、475 年回歸期設計地震、2500 年回歸期最大考量地震對應之反應譜。

表 4-1 國內港灣構造物設計基準之三等級設計地震力

地震等級		地震力計算公式
中度地震	解說：約 30 年回歸期	$V^* = \frac{IF_u}{4.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W$
設計地震	475 年回歸期	$V = \frac{I}{1.4\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W$
最大考量地震	2500 年回歸期	$V_M = \frac{I}{1.4\alpha_y} \left(\frac{S_{aM}}{F_{uM}} \right)_m W$

本研究參考本所過去之「港灣地區地震潛勢及港灣構造物耐震能力評估之研究」報告中基隆港、臺中港、高雄港、蘇澳港的各港區平均地震危害度曲線，如圖 4.1，推估出目前國內建築及橋梁各重要度等級之中度地震所對應的回歸期(概略值)，如表 4-2 所示。由表中數值顯示，目前國內現行「港灣構造物設計基準」之中度地震在各港區工址所對應的地震回歸期皆約為 30 年，而 2500 年回歸期地震 PGA 則約為 475 年回歸期地震的 1.3~1.4 倍。

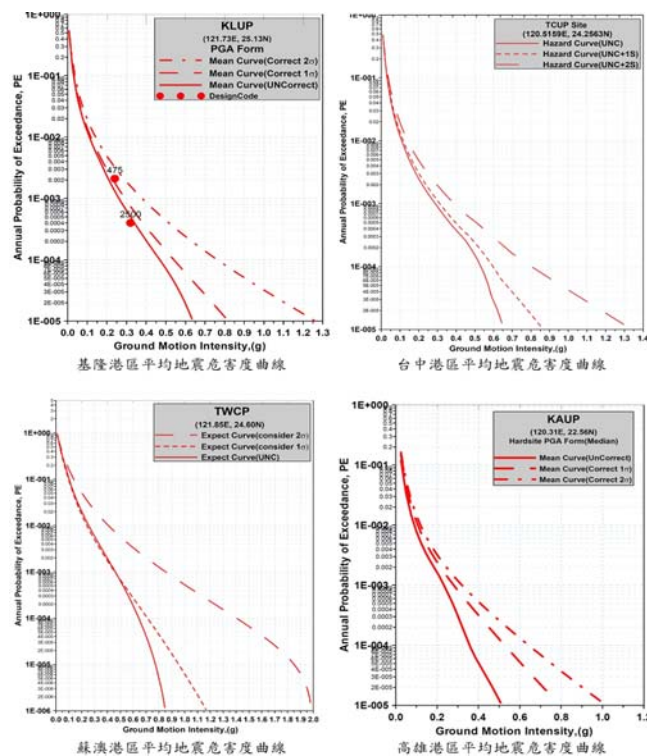


圖 4.1 四港區平均地震危害度曲線

資料來源：港灣地區地震潛勢及港灣構造物耐震能力評估之研究

表 4-2 國內建築及橋梁之中度地震所對應的回歸期概略值

中度地震等級	建築 $I \times 475$ 年地震/4.2	橋梁 $I \times 475$ 年地震/3.25
約 15 年回歸期	0.8×475 年/4.2=475 年/5.25	—
約 30 年回歸期	1.0×475 年/4.2=475 年/4.2	0.8×475 年/3.25=475 年/4.06
約 50 年回歸期	1.25×475 年/4.2=475 年/3.36	1.0×475 年/3.25=475 年/3.25
約 75 年回歸期	1.5×475 年/4.2=475 年/2.8	1.25×475 年/3.25=475 年/2.6
約 100 年回歸期	—	1.5×475 年/3.25=475 年/2.17

依據前述資料，港灣構造物耐震功能性設計之地震力等級建議修正項目如下：

1. 中度地震之規定

一般而言按照不同種類之構造物的重要度排序，其次序應為碼頭>橋梁>建築，由國外各建築橋梁耐震基準之規定亦可看出此排序現象，例如日本及 INA 基準之中度地震皆設定為 75 年回歸期地震，而日本橋梁基準之中度地震則設定為 50 年回歸期地震，然而國內「港灣構造物設計基準」採用建築耐震設計規範之中度地震，其為 475 年回歸期地震除以 4.2，且其規範解說中說明所對應之地震回歸期約為 30 年，明顯低於國際基準，亦低於國內橋梁耐震設計規範之中度地震(475 年回歸期地震除以 3.25)。

因此本研究建議至少應將現行基準碼頭之中度地震強度由「475 年回歸期地震除以 4.2」上調至「475 年回歸期地震除以 3.25」，與橋梁相同，則地震回歸期約提昇至 50 年，較符合碼頭之重要性程度。

2. 設計地震與最大考量地震

棧橋式碼頭結構形式及靜不定度與橋梁工程較相近，不如建築結構因高靜不定度而擁有較高的降伏後強度，因此設計地震與最大考量地震之計算公式($V = \frac{I}{1.4\alpha_y} \left(\frac{S_{ad}}{F_u} \right)_m W$)中，分母係數 1.4 應同橋梁改

為 1.2 較為恰當。簡言之，三等級地震力計算方式皆改為與橋梁相同，如表 4-3 所示。

表 4-3 橋梁耐震設計規範之三等級地震力

地震等級		地震力計算公式
中度地震	約 50 年回歸期	$V_{\min} = \frac{IS_{aD}}{3.25\alpha_y} W$
設計地震	475 年回歸期	$V_D = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W$
最大考量地震	2500 年回歸期	$V_M = \frac{I}{1.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aM}}{F_{uM}} \right)_m W$

綜上所述，本研究建議港灣碼頭之三等級地震力定義如下：

(1) 等級一：中度地震：

為一常遇地震，其強度計算上：

為 475 年回歸期地震除以 3.25，地震回歸期約為 50 年。

(2) 等級二：475 年回歸期地震：

為一偶遇地震，其 50 年超越機率為 10%。

(3) 等級三：2500 年回歸期地震：

為一罕遇地震，其 50 年超越機率為 2%。

另由於剛性碼頭其結構並無韌性，因此在地震力計算上 F_u 值等於 1.0，則表 4-3 內之地震力計算公式即與國內現行「港灣構造物設計基準」之剛性碼頭設計地震力公式相同，即分母亦為 1.2。

4.2.2 功能性水準

本研究依各國功能性基準之慣例，從構造物之「使用性」、「修復性」、「安全性」三方面考量，並參考國內現行「港灣構造物設計基準」之功能性水準定義，建議出未來國內港灣碼頭耐震功能性設計之功能水準。

由於 475 年回歸期地震為主要的設計地震，而國內碼頭結構設計之重要度分類向來皆分為 4 種(特定、A 級、B 級、C 級)，此與國際基準相同；再者，「公共工程功能性設計準則」中亦說明，耐震功能性設計的基本概念主要是採用構造物的非線性行為分析進行設計，故應將「用途係數」轉換於耐震功能性水準的要求上面，而非用於設計地震力的放大；因此在同一 475 年回歸期地震作用下，欲區分 4 種不同重要度構造物之功能性水準，即須具有 4 等級功能性水準之制定，如表 4-4。

而表 4-4 之第 I、III、IV 等級功能性水準亦恰符合現行「港灣構造物設計基準」設計目標中三等級地震所各別對應的功能性要求。

表 4-4 耐震功能性水準定性規定之建議

損壞等級	使用性	修復性	安全性
第 I 等級	功能正常	不需修復	結構保持彈性
第 II 等級	短期功能喪失	可快速修復	損壞輕微
第 III 等級	長期功能喪失	修復非常困難	損壞嚴重但維持生命安全 (未超過韌性容量)
第 IV 等級	無法恢復營運	須拆除重建	結構崩塌(超過韌性容量)

4.2.3 重要度分類

為了維持業主及工程師既有的設計習慣，碼頭重要度分類建議仍然維持現行基準的規定，如表 4-5，目前國內現行基準訂立的港灣構造物重要度分類與「INA 港灣構造物耐震設計準則」雷同，如此則亦可參考「INA 港灣構造物耐震設計準則」之相關規定來制定本國港灣碼頭之耐震功能性目標。

在重要度分類上仍維持現行港灣構造物設計基準之規定，依據結構物之重要性區分為「特定」、「A」、「B」、「C」等四種等級類別，各等級之碼頭特性如表 4-5 所述。

表 4-5 各重要度等級之碼頭特性

等 級	碼 頭 之 特 性
特 定	明顯具有 A 級結構物之特性 1 至 3 項之情形者
A	1.結構物在遭受地震災害時，將有可能造成多數人命及財產之損失者。 2.負有震災後復建工作之重要任務者。 3.儲存有害或危險物品之結構物，在遭受地震災害時，將可能造成人命或財產之重大損失者。 4.結構物在遭受地震災害時，對於相關區域之經濟與社會活動將造成重大影響者。 5.結構物在遭受地震災害時，其復舊作業經預測將相當困難者。
B	凡不屬於特定、A 級、C 級者
C	特定及 A 級以外之小規模結構物復舊作業容易者。

4.3 現行基準之功能性目標

以基本設計要求所考量之一般碼頭為準，其所考慮之三個地震等級，亦對應有三個功能性水準，分別為「維持原有功能」、「損傷可修復」、「避免崩塌」，重要碼頭之功能性水準則以用途係數間接提高。

1. 中度地震

因為結構在此使用年限中遭遇中小度地震的機率甚高，因此要求結構物在此地震水平下結構物維持在彈性限度內，地震過後，結構物主體沒有任何損壞。對剛性結構物如重力式碼頭而言，在 30 年回歸期之地震發生時，不得產生滑動、傾覆，亦不得產生結構體強度與基礎承载力不足之任何破壞。

2. 設計地震

在此地震等級下結構物不得產生嚴重損壞，造成嚴重的人命及財產損失，且必須可以修復；具韌性材料之構造物，其結構物產生的韌性比不得超過其容許韌性容量。

3.最大考量地震

設計目標為在此強烈地震下結構主體不致產生崩塌，在此設計目標下之韌性結構物允許其韌性容量用盡。在配合動力分析的情況下，針對特殊耐震與高重要性碼頭結構，其在 2500 年回歸期之地震作用下，最大容許破壞值不得高於上述 475 年回歸期地震作用下之設計水準。

由前述三等級設計地震所要求的功能性目標可歸納如表 4-6 所示。

表 4-6 國內現行港灣構造物設計基準之功能性目標

功能水準 地震力	第 I 級	第 II 級	第 III 級	第 IV 級
中度地震約 30 年回歸期地震	C (I=0.8) B (I=1.0) A (I=1.25) 特定(I=1.5)	—	—	—
475 年回歸期地震	—	—	C (I=0.8) B (I=1.0) A (I=1.25) 特定(I=1.5)	—
2500 年回歸期地震	—	—	特定(I=1.5)	C (I=0.8) B (I=1.0) A (I=1.25)

而從「INA 港灣構造物耐震設計準則」與「日本港灣施設技術上基準」之功能性目標(表 3-3 及表 3-11)可知，國內現行基準之特定級碼頭(耐震強化碼頭)的功能性目標要求明顯低於國外基準，尤其臺灣與日本同為海島型國家，國內原料礦產貧瘠，所有原物料及物資皆需倚靠港口運輸，特別是災難性地震發生時，外援物資對於社會經濟恢復格外重要，設立耐震強化碼頭的目的即是在災難地震後仍可有部分功能良好之碼頭可供救援物資運輸，因此國際航海協會(INA)及日本基準對於特定級碼頭之功能要求皆為等級二(475 回歸期)地震作用下結

構須保持彈性，而國內現行港灣構造物設計基準則是以中度地震力的 1.5 倍作用下保持彈性作為設計基準，而由表 4-2 可知 1.5 倍中度地震約為 75 年回歸期地震，其遠小於 475 年回歸期地震，此等級功能目標可否滿足特定級碼頭所需之救災功能值得商榷，故建議應予調整提升。

本研究再將表 4-6 繪製成功能目標區域圖，可比表 4-6 更清楚說明國內現行基準之功能目標的定義及特性，如圖 4.2 所示，該圖縱軸各等級回歸期地震強度之比例係按圖 4.1 各港區之平均地震危害度曲線推估而得，雖為一概略性的比例，但比表 4-6 更能精確反映各等級碼頭之功能目標的確切界線為何。

在此舉例說明圖 4.2 的使用方式，例如某一碼頭結構在各等級地震作用下結構分析後分別所得到的反應假設皆落在「曲線 1」及「曲線 2」之間的區域，則此碼頭可定義為 C 級碼頭，但若有任何一等級地震之結構反應落於「曲線 1」之上側，則此碼頭即不符合 C 級碼頭規定之功能性目標；若有任何一等級地震之結構反應落於「曲線 2」之下側，但其餘等級地震之反應仍落在「曲線 1」及「曲線 2」之間的區域，則仍為 C 級碼頭。其餘等級碼頭之功能性目標定義亦依此類推。

因現行基準規定，特殊耐震與高重要性碼頭結構最大考量地震之設計目標不得高於上述 475 年回歸期地震作用下之設計水準，因此才形成特定級碼頭 2500 年回歸期地震作用下結構反應須滿足第 III 級功能性水準，故圖 4.2 特定級的曲線在末端會往下折，若在建築物耐震設計基準中則無此規定，則圖 4.2 特定級目標曲線將沿虛線延伸。

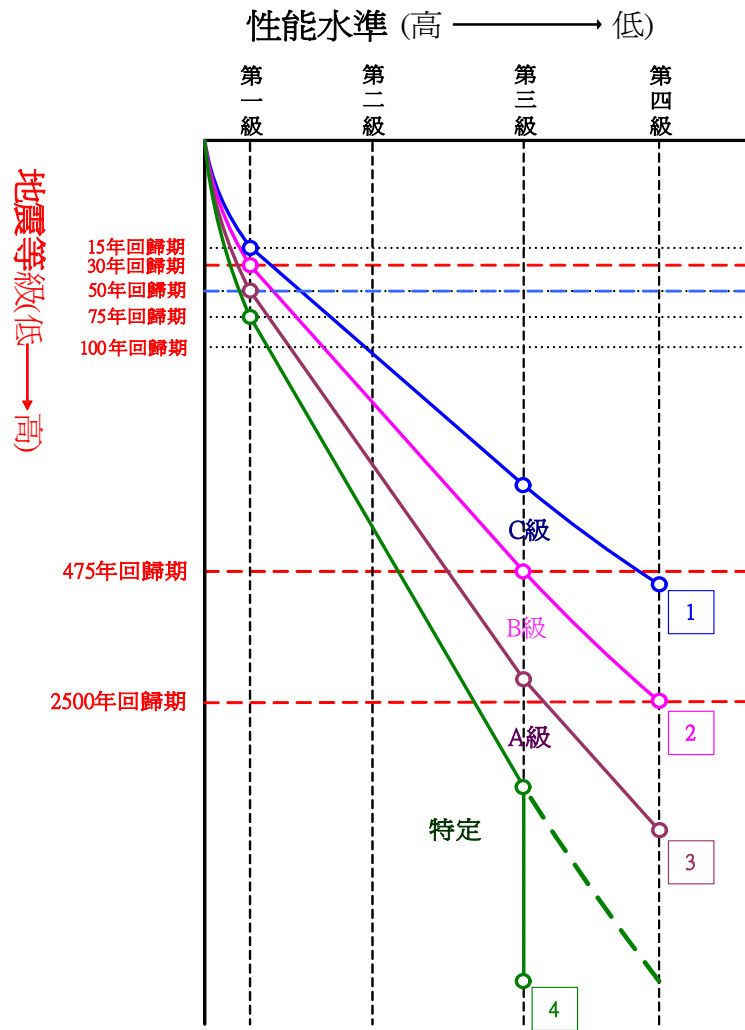


圖 4.2 國內現行基準的耐震功能性目標區域圖

4.4 國內港灣碼頭功能性目標制定之建議

國內現行基準 4 種等級碼頭「特定級、A 級、B 級與 C 級」的用途係數，分別為 1.5、1.25、1.0、0.8，由此可知，各等級地震所對應之結構功能性水準，應顯示著特定級碼頭功能性水準高於 A 級碼頭，A 級碼頭功能性水準又高於 B 級碼頭，B 級碼頭功能性水準則高於 C 級碼頭。

由原基準 B 級碼頭之用途係數為 1.0 可知，B 級碼頭為一個標準碼頭，因此吾人可依原基準賦予 B 級碼頭之功能性目標為基準，按各

種碼頭之重要度依序分配各地震等級所應對應的功能性水準。

475 年回歸期地震為主要設計地震，在此等級地震作用下，4 種重要度碼頭將按重要度依序對應 4 種等級之功能性水準。因此為引入耐震功能性設計法，基準應對眾多人命安全有嚴重威脅、具特別重要性需在震後維持使用功能以利救災、需處理危害物品、或其破壞對社會環境與經濟會有嚴重衝擊與損害之設施，定為「特定級」耐震強化碼頭，功能性目標要求在 475 年回歸期地震力作用下應滿足第 I 級功能性水準；若以上各項影響較小，但破壞後很難修復者，則定為「A 級」碼頭，在 475 年回歸期地震力作用下應滿足第 II 級功能性水準；小型且修復較容易之設施或臨時結構，定為 C 級碼頭，在 475 年回歸期地震力作用下應滿足第 IV 級功能性水準；其他非「特定、A 級、C 級」碼頭者則為 B 級碼頭，在 475 年回歸期地震力作用下應滿足第 III 級功能性水準。

中度地震以橋梁規範之計算方式為主，由約 30 年回歸期提升至約 50 年回歸期，由於特定級碼頭已要求在 475 年地震作用下保持彈性滿足第 I 級功能性水準，因此不需額外檢核中度地震作用下之功能性水準，其餘 A、B 級碼頭為中度地震作用下須滿足第 I 級功能性水準，而 A 級碼頭之受震反應更需小於 80% 的降伏變形；另 C 級碼頭依序為滿足第 II 級功能性水準。

本研究建議之功能性目標不同於日本與 INA 基準，須增加 2500 年回歸期最大考量地震所對應的功能性水準來規定「特定級」、「A 級」與「B 級」的碼頭功能，以滿足現行基準要求 A、B 級碼頭在 2500 年回歸期地震作用時應不會發生倒塌，而「特定級」碼頭之損壞更不可高於 475 年回歸期地震作用下之功能性水準，使其在災難地震後仍具有修復機會。因此建議在 2500 年回歸期地震作用下，按重要度排序，特定級碼頭須滿足第 II 級功能性水準，A 級碼頭須滿足第 III 級功能性水準，B 級碼頭須滿足第 IV 級功能性水準，而 C 級碼頭在此等級地震作用下應已崩塌故不需檢核。

綜合上述之說明，在提升中度地震等級與特定級碼頭之功能性目標後，各級碼頭對應的功能性目標可歸納如表 4-7 所示。工程師可依據環境條件與業主對功能之要求來選擇合適的碼頭等級，再依據該等級碼頭所對應之功能性目標進行設計、分析、檢核。

表 4-7 本研究建議之各等級碼頭所對應的耐震功能性目標

功能水準 地震等級	第 I 級	第 II 級	第 III 級	第 IV 級
等級一 (中度地震)	A 級 小於 80%降伏反應	C 級	—	—
	B 級			
等級二 (475 年回歸期地震)	特定級	A 級	B 級	C 級
等級三 (2500 年回歸期地震)	—	特定級	A 級	B 級

由表 4-7 可知，「C 級」碼頭僅須檢核中度地震及 475 年回歸期地震下對應之功能性水準，而「B 級」與「A 級」碼頭則需檢核中度地震、475 年及 2500 年回歸期三種等級地震下所對應之功能性水準。「特定級」碼頭僅需檢核 475 年及 2500 年回歸期兩種等級地震下之功能性水準。

本研究再將表 4-7 所述之功能性目標繪製成功能目標區域圖，可更清楚說明建議的功能性目標之定義範圍與特性，如圖 4.3 所示，而此圖之使用方式與圖 4.2 相同。

雖然從表 4-7 中顯示 A 級碼頭與 B 級碼頭在中度地震等級下對應的功能性水準皆須滿足第 I 級，但在圖中即顯示出差異，原因為 A 級碼頭在 475 年回歸期與 2500 年回歸期地震等級下，其設計功能性水準要求皆比 B 級碼頭高出一級，因而自然形成 A 級碼頭的設計強度容量高於 B 級碼頭，在相同中度地震進行彈性分析檢核時，A 級碼頭的結構反應理應小於 B 級碼頭。

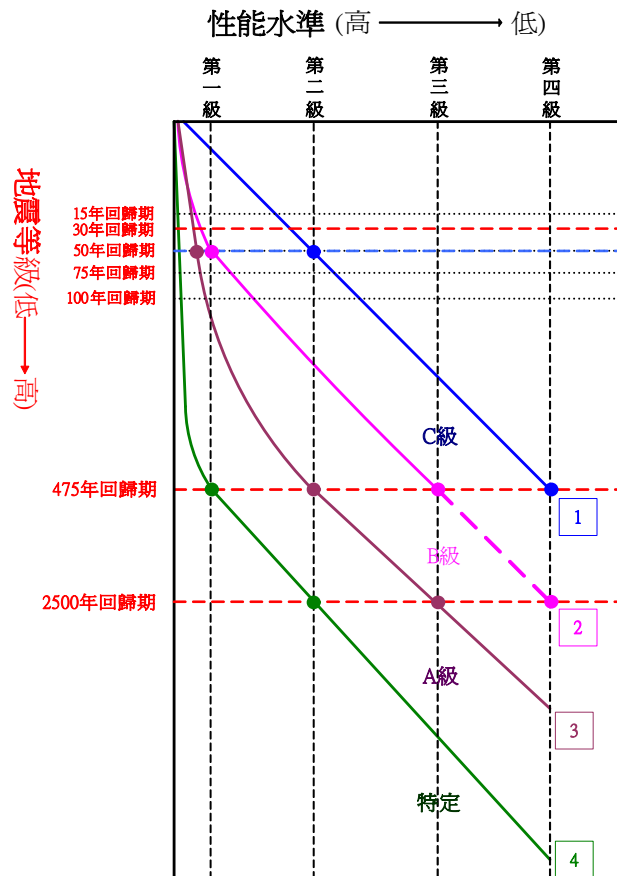


圖 4.3 本研究建議的港灣碼頭耐震功能性目標區域圖

4.5 現行基準與本研究建議功能性目標之差異性探討

本研究將「建議的港灣碼頭耐震功能性目標區域圖」與「現行基準的耐震功能性目標區域圖」兩者進行套繪比較，如圖 4.4 所示，差異處條列如下：

- 1.基本上建議的功能性目標涵蓋範圍比現行基準大，因此工程師進行碼頭設計時將更具彈性。
- 2.C 級碼頭的功能性目標與現行基準比較稍不保守，但可明確掌握結構功能並具經濟性，加以突顯 C 級碼頭適用於小規模結構物復舊作業容易者或臨時結構之特性。
- 3.特定級碼頭功能性目標比現行基準保守許多，但與國際航海協會

INA 及日本基準之功能性要求相同，以突顯設置耐震強化碼頭之概念。

4. A 級碼頭與 B 級碼頭之建議功能性目標，除中度地震回歸期稍調高外，其餘功能性目標皆與現行基準相近，A 級碼頭功能性目標曲線雖然看起來差異較大，但是從第 I、III、VI 級功能性水準的地震力強度來比較，事實上是接近的，由於現行基準並無定義第 II 級功能性水準所應對應的地震等級強度，因此本研究簡單假設為線性，故與建議之功能性目標差異較大。

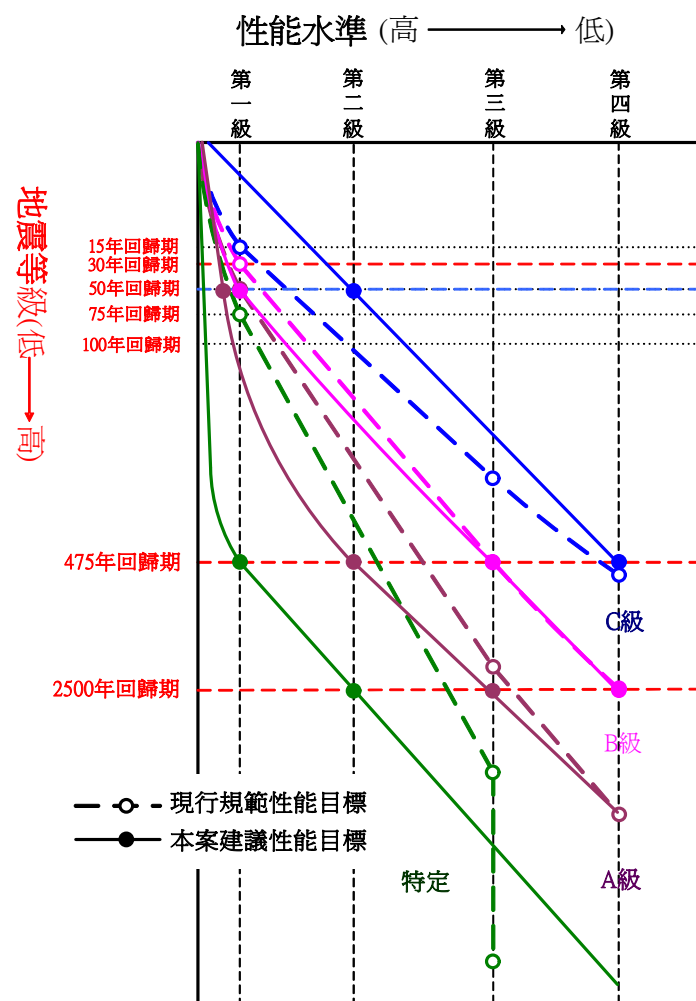


圖 4.4 研究建議與現行基準之港灣碼頭耐震功能性目標區域比較

第五章 重力式碼頭功能性規定及分析方法探討

由第四章對碼頭耐震功能性目標的探討可知，國際航海協會之港灣構造物耐震設計基準為一國際性基準，且基準之架構與我國耐震功能性設計之相關規定較為相近，因此本研究建議未來我國港灣構造物之耐震功能性目標可參照國際航海協會之相關規定，再配合公共工程功能性設計準則之規定，增加最大考量地震(2500 年回歸期)等級，修正為本土化之碼頭耐震功能性設計目標；另外，本章將以本研究所建議的功能性目標為基礎，針對重力式碼頭，依使用性及安全性，詳細說明國際航海協會對於耐震功能性標準值之規定及使用方式，該基準根據相關之主要參數(例如：岸肩沉陷量、碼頭傾斜度及最大位移等)，建立碼頭在各功能性水準下該參數之可接受標準值，以定量的方式表達碼頭結構物之功能性，並作為耐震設計之目標值供國內工程師參考，以判別功能性目標是否滿足要求。

5.1 重力式碼頭功能性可接受標準

重力式碼頭由壁體與背填料組成，這種碼頭屬於剛性結構，水平地震力比垂直地震力之影響來的大。過去之震害中，當基礎地層較堅硬時，較典型之破壞型式為向海側之位移與傾倒，若基礎地層較軟弱時，較易發生較大的向海側之位移、傾倒以及沉陷。值得注意的是：土壤液化可能是導致重力式碼頭破壞的原因之一，例如：921 集集地震對臺中港 1~4 號碼頭造成嚴重損害，除了地震力已超過設計震度以外，因土壤液化致使碼頭後線陸地多處開裂、地層塌陷並形成坑洞、碼頭沉箱與背填陸地龜裂並錯開分離，導致碼頭沉箱向海側位移及傾倒，碼頭上各種相關設施及結構物傾倒、破壞等。所以，除了確保基礎具有足夠之承载力，避免土壤液化潛能過高以外，保持這類構造物在背填土壓與水壓下，抗傾覆與抗滑動之穩定性，一直是這類構造物之設計目標的。考量這類碼頭之破壞與使用運作之功能性參數可由下列參數表

達，如圖 5.1，壁體相關參數為：向海側之水平位移或正規化水平位移(=水平位移 d /壁體高度 H)、向海側不均勻沉陷量或沉陷量差、向海側傾斜角，岸肩(Apron)變形相關之參數：碼頭壁體與岸肩(Apron)之沉陷差、岸肩不均勻沉陷量或傾斜角等。

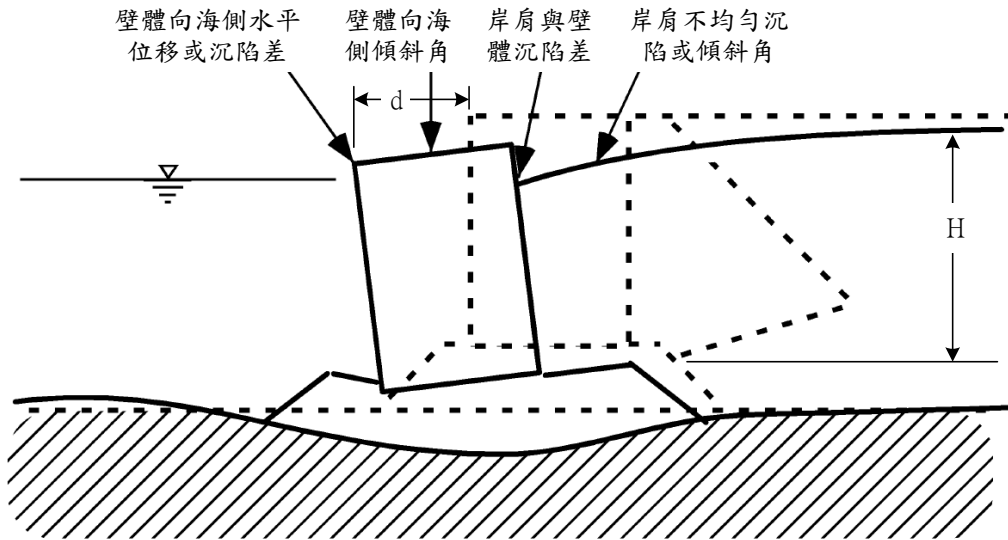


圖 5.1 重力式碼頭之功能性參數

資料來源：[INA 2001]

國際航海協會[INA 2001]所頒布之港灣結構物耐震設計準則中，將各等級功能性水準以功能性參數之可接受標準值加以限定，如表 5-1 所示，參考第四章之功能性目標，依碼頭之重要度等級，其三等級地震力對應不同的功能性水準，再對照表 5-1 得到各功能性水準所對應之可接受標準值，經由結構分析所得之構造物反應檢核其是否符合標準值。基本上第 I 級功能性水準多用以檢核結構物使用性，因此壁體傾角及岸肩沉陷量皆有所限定，以避免中小地震侵襲時造成碼頭營運中斷，而第 II 級功能性水準以上的破壞程度皆必須進行修復後方能恢復營運，且岸肩沉陷修復較為容易，因此原則上岸肩傾角及沉陷量不進行檢核，僅針對壁體分析其受震後剛體運動所產生的正規化位移及傾斜角是否滿足相應功能性水準之可接受標準值。另外，表 5-1 中的值為

最低設計要求，在工程實務中，除了參照這些最低標準值以外，亦需根據業主之要求加以修訂。

表 5-1 重力式碼頭功能性可接受標準

功能性水準			第 I 級	第 II 級	第 III 級	第 IV 級
參數						
殘餘變位	壁體	正規化水平位移 d/H	$<1.5\%$ 或 $d<30\text{cm}$	$1.5\%\sim 5\%$	$5\%\sim 10\%$	$>10\%$
		向海側傾斜角	$<3^\circ$	$3^\circ\sim 5^\circ$	$5^\circ\sim 8^\circ$	$>8^\circ$
	岸肩	不均勻沉陷量	$3\text{cm}\sim 10\text{cm}$	N/A	N/A	N/A
		岸肩與後線陸地之沉陷差	$30\text{cm}\sim 70\text{cm}$	N/A	N/A	N/A
		向海側傾斜角	$<2^\circ\sim 3^\circ$	N/A	N/A	N/A

註：d 為壁頂的殘餘水平變位

N/A 之原文註解為「Not Applicable」，由 INA 設計例可知實際設計時不予檢核。

資料來源：[INA 2001]

另外，此類碼頭之破壞通常不是結構整體之倒塌損壞，而是過大變形引起之破壞，其可能之破壞情形可參考圖 5.2，因此以位移來定義此類碼頭之耐震功能性，並以此作為設計之依據可能更顯適宜；再者，重力式碼頭之耐震功能性雖可以如上述由壁體之水平位移、沉陷、傾斜角與岸肩之沉降量、沉陷差等作表示，但其中部分參數之間具有相關性，初步設計與耐震功能檢核時，不必同時選擇所有參數，例如初步設計時，可選擇功能性水準第 I 級之功能性參數進行設計，第 I 級功能性水準多在結構彈性範圍，因此在分析設計上應有相當之把握，待構造物初步設計完成後，再以適當之分析方法來進行其他等級功能性水準之可接受標準值驗證分析，以完成整體耐震設計。

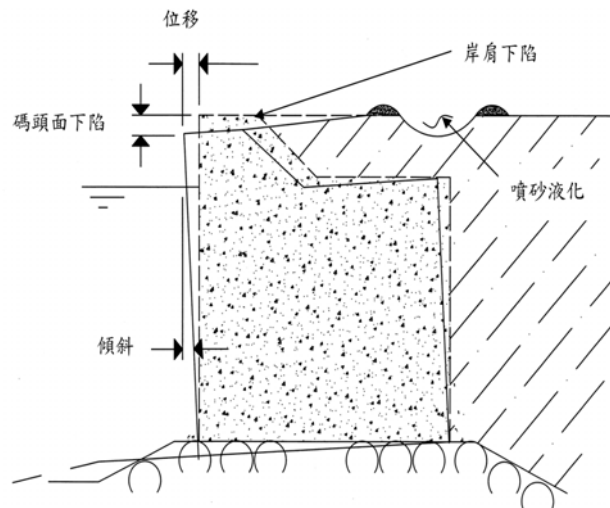


圖 5.2 重力式碼頭之破壞模式

5.2 重力式碼頭耐震功能性分析法

本研究參考國際航海協會[INA 2001]所頒布之港灣結構物耐震設計準則將分析之方法由簡到繁分為簡便分析(Simplified Analysis)、簡便動力分析(Simplified Dynamic Analysis)以及動力分析(Dynamic Analysis)三類，選用這三種不同複雜等級之分析方法，除了與碼頭重要度等級之高低相關以外，還與所作用的地震等級相關，如表 5-2 所示；由於性能目標中在等級一地震作用下之性能水準要求多需保持結構在彈性狀態，因此一般實務設計上多採等級一地震作用下先進行彈性分析做初步設計，接著再按等級二與等級三地震作用下所要求之性能水準進行驗證分析檢核，若不滿足可接受標準則重新進行初步設計後再驗證檢核，直到滿足所有性能目標要求為止。

簡化分析是經由簡單的分析計算所得之結果去近似結構之真實反應，對於較低重要度等級(例如 C 級)之結構，此類分析法可適用於所有地震等級作用下之性能評估；對於重要度等級較高者(例如 B 級、A 級與特定級)，則可應用在等級一地震力作用下之初步設計階段或服務使用性之評析。

簡化動力分析方法比簡化分析法較複雜，對 B 級及 B 級以下重要度之耐震結構，可適用於所有地震等級作用下之性能評估；對於重要度等級較高者(例如 A 級與 S 級)，可應用在等級一地震力作用下之初步設計階段或服務使用性之評析。

動力分析方法為三類分析方法中之最複雜者，可適用於包括具有較高重要度等級(例如 A 級與 S 級)在內之耐震結構物的之所有地震等級作用下之性能評估。

表 5-2 各類設計方法之應用時機

碼頭重要度 地震等級	特定級	A 級	B 級	C 級
等級一 (中度地震)	—	- 簡化分析 - 簡化動力分析 - 動力分析	- 簡化分析 - 簡化動力分析 - 動力分析	- 簡化分析 - 簡化動力分析 - 動力分析
等級二 (475 年回歸期地震)	動力分析	動力分析	- 簡化動力分析 - 動力分析	- 簡化分析 - 簡化動力分析 - 動力分析
等級三 (2500 年回歸期地震)	動力分析	動力分析	- 簡化動力分析 - 動力分析	—

茲將國際航海協會[INA 2001]重力式碼頭的耐震能力設計方法或評估方法依簡便分析法(擬靜力分析)、簡便動力分析法(滑動塊體法)與動力分析法(有限元素或有限差分法)等三種方法分別敘述說明如下。

5.2.1 簡便分析法

可採用傳統設計基準或基準中，基於力量平衡之擬靜態分析方法，地震力作為施加於結構側向之靜態慣性力。結構主體與支承土壤均視為剛體，地震力由設計最大地表加速度 PGA 或震度(Seismic coefficient) K_h 表示，簡便分析法之結果為結構臨界安定之最大地表加速度或震度 K_t ，可經由逐步增加 PGA 或 K_h ，計算結構分別達到 $F_s = 1.0$ 時之臨界滑動、臨界傾覆或臨界穩定性狀態之最大地表加速度或震度，

取其最小值，則結構抵抗實際發生之地震(有效震度為 K_e)具有之安全係數 $F_s = \frac{K_t}{K_e}$ ，設計分析時，以預期要抵抗之設計地震力對應之震度 K_h 作為 K_e ， K_e 之上限以不超過 PGA/g (當 $PGA \leq 200\text{gal}$) 或 $1/3(PGA/g)^{1/3}$ (當 $PGA > 200\text{gal}$) 計算，平均值以 $K_e = 0.6(PGA/g)$ 計算。

雖然功能性設計法所採用之簡便分析方法與傳統設計所採用之分析方法類似，但設計原理完全不同：傳統設計法將地震力以一等效之靜態側向力施加於結構主體上，以確保結構主體在所考量之設計外力作用下，具有一定安全餘裕(以安全係數 F_s 表示)之安定計算(壁體滑移、壁體傾倒、圓弧滑動及沉陷等分析，基礎足夠承載力之保證)來確定結構之細部；功能性設計法雖然在具體設計階段採用類似擬靜態分析方法，但其設計原理以確保在各等級地震力作用下，結構主體之反應滿足預期之功能性目標，即計算所得之功能性指標不超過預定功能性目標標準值。例如：若以壁體位移或沉陷量等作為功能性指標，在功能性設計法中，需要計算壁體位移或沉陷量，並與所建立之功能性目標量化標準值比較，以確定所預期之功能性是否滿足。一些研究已根據統計數據之回歸分析，建立了位移指標與傳統設計法中安定計算之安全係數之間相關性之經驗公式，如表 5-3 所示，表 5-3 適用於非液化工址之重力式碼頭，其中， F_s 表示安全係數。由表 5-3 可知：線性回歸公式中，水平位移相關參數(d 與 d/H)之線性回歸相關係數均較小，相關係數與標準偏差顯示：對 d/H 之線性回歸比 d 較為準確。

表 5-3 非液化工址重力式碼頭變位與安全係數之相關性

變位參數	經驗公式	相關係數	標準偏差
最大水平位移 d (cm)	$d = -74.2 + 98.2(1/F_s)$	0.34	130
沉陷量 s (cm)	$s = -16.5 + 32.9(1/F_s)$	0.5	30
正規化水平位移 d/H (%)	$d/H = -7.0 + 10.9(1/F_s)$	0.38	13

資料來源：Uwabe [1983]

5.2.2 簡便動力分析

相對於靜力分析法與有限元素分析法而言，滑動塊體分析法 (sliding block analysis) 的精神是將結構主體視為可滑動之剛體，地震力為作用於結構基礎之地震加速度歷時，主要分析結構物受地震力作用超出其抗滑動能力時的反應，以及計算地震所引致總滑移量。為了評估重力式碼頭結構物受地震作用之滑移量，根據[Newmark]提出的簡便滑動塊體法來分析剛性塊體在於水平地表運動過程期間所導致的總滑移量。如圖 5.3 所示，假設質量 m 的塊體為剛體，放置於水平地表面上，而滑動面的力學行為與彈塑性模式相符合；當地震發生時，塊體之水平方向慣性力由滑動面之抗剪力來維持塊體的動態平衡，所以塊體之運動狀態與滑動面所提供的抗剪力有關。

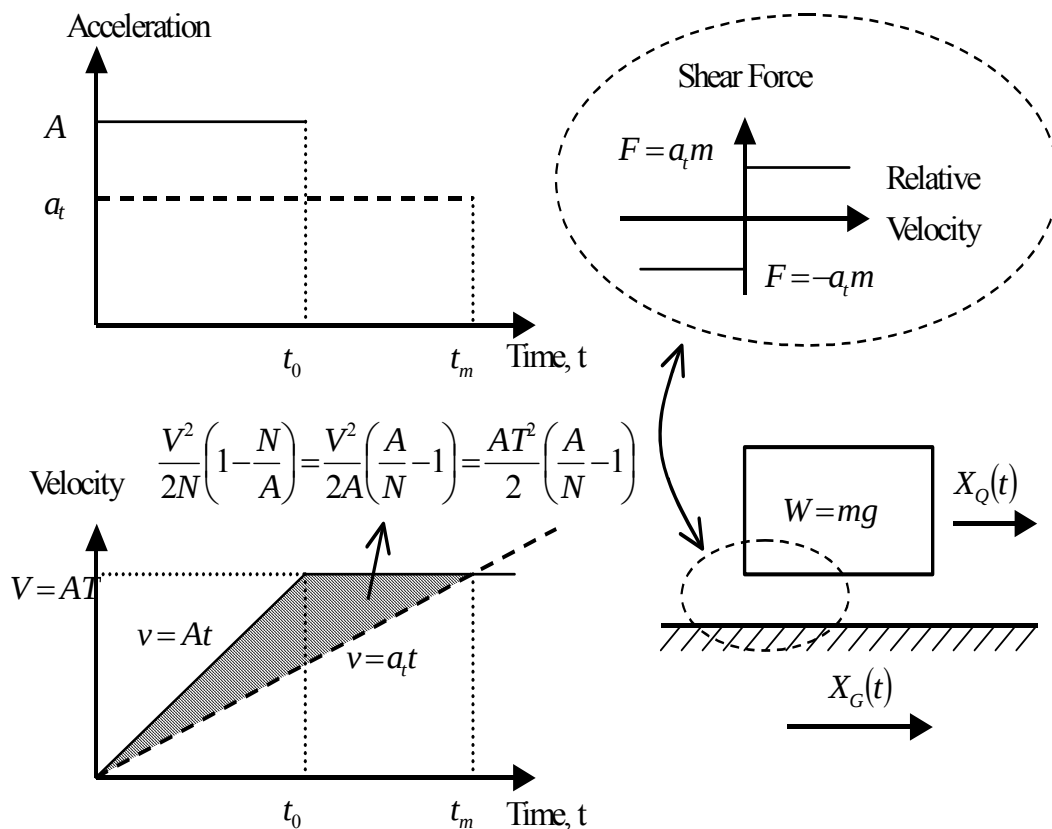


圖 5.3 Newmark 之滑動塊體分析法的觀念

資料來源：參考文獻[Newmark]

當地震發生時，假設地表位移歷時為 $X_G(t)$ ，塊體位移歷時為 $X_Q(t)$ ，塊體因受慣性力作用而有向外滑動之趨勢，並由滑動面之抗剪力來維持塊體的動態平衡。當塊體未滑動時，塊體與地盤一起運動；當塊體之水平慣性力大於滑動面之極限抗剪力時，則塊體與地表之間就有相對運動發生，此時之加速度稱為臨界滑動加速度 a_t ；而在滑動期間，若地盤與滑動塊體之相對速度減為零時，則滑動停止，塊體再次與地表一起運動。根據滑動面為彈塑性模式之假設，滑動期間之滑動塊體以等加速度 a_t 運動，因而將塊體與地表間之相對加速度積分二次則可求得塊體滑移量。重力式碼頭利用滑動塊體分析法之簡便動力分析流程如圖 5.4 所示，詳細分析方法說明如下。

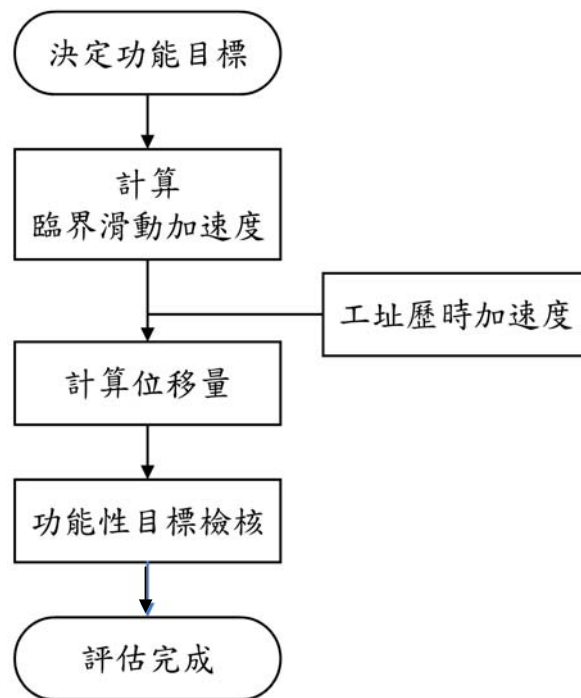


圖 5.4 重力式碼頭簡便動力分析(滑動塊體分析法)評估流程圖

1. 計算臨界滑動加速度 a_t

採用滑動塊模型簡便計算重力式碼頭在地震中的永久位移，首先以側向土壓理論評估壁體與背填土壤之穩定性，仍然如同簡便分析得到臨界滑動加速度 a_t ，例如垂直擋土壁之臨界滑動加速度 a_t 可

以由下式計算：

$$a_t = \left[\mu_b - \frac{P_{AE} \cos \delta - \mu_b P_{AE} \sin \delta}{W_g} \right] g \dots\dots\dots (5-1)$$

其中， μ_b 為壁體與基礎接觸面之摩擦係數， P_{AE} 為動態主動土壓力， δ 為壁面之摩擦角， W_g 為壁體每單位寬度之重量，由於 P_{AE} 本身與 a_t 相關，故需以疊代方式計算臨界滑動加速度。

2. 計算塊體滑移量

臨界滑動加速度 a_t 確定以後，需選擇地震加速度歷時來進行滑動塊分析，因為該分析之結果受地震加速度歷時特性之影響較大，所以，通常要選擇多組與設計地震之等級、強震延時及反應譜內涵相符之地震加速度歷時。當歷時中的加速度超過臨界滑動加速度 a_t ，壁體與背填土系統開始滑動，將超過 a_t 直到滑動停止之加速度歷時二次積分，得到壁體相對於滑動面以下堅實基礎之位移。

基於此方法，可得到地震強度與其所導致之變形之關係。INA 的設計準則中呈現 Franklin 與 Chang 基於近 200 組地震歷時 ($PGA = a_{max} = 0.5g$ ， $PGV = v_{max} = 76cm/s$) 之分析發展出滑動位移量與臨界滑動加速度 a_t 及設計地震最大地表加速度 a_{max} 之關係曲線圖，對於 $a_t \geq 0.3a_{max}$ 之情形，Richards 與 Elms 提出簡便公式計算永久側向位移 d ：

$$d = 0.087 \frac{v_{max}^2 a_{max}^2}{a_t^4} \dots\dots\dots (5-2)$$

雖然滑動塊理論顯示垂直向地震力會影響滑動位移量，但 Nagao 等人之參數分析指出該誤差在約 $\pm 10\%$ 以內。除了 a_t 與地震歷時特性以外，Whitman 與 Liao 採用 14 組地動，對影響滑動位移量之相關參數(如背填土之動態反應、回填楔型塊之運動、壁體之傾斜以及垂直地震加速度等)之敏感度分析後，建議平均滑動位移 $\bar{d}$ 計算公式：

$$\bar{d} = \left(\frac{37v_{\max}^2}{a_{\max}} \right) \exp \left(-\frac{9.4a_t}{a_{\max}} \right) \dots\dots\dots (5-3)$$

也基於此建議設計時採用

$$\frac{a_t}{a_{\max}} = 0.66 - \frac{1}{9.4} \ln \frac{d \cdot a_{\max}}{v_{\max}^2} \dots\dots\dots (5-4)$$

而 1994 年之歐洲暫時性基準提出水平震度係數 K_h 及垂直震度係數 K_v 與設計加速度 a_{design} 及容許滑動位移量之關係

$$K_h = \frac{a_{\text{design}} / g}{r} \dots\dots\dots (5-5)$$

$$K_v = \frac{a_{\text{design}} / g}{r} \dots\dots\dots (5-6)$$

其中，折減係數 r 對於容許位移達 $30(a_{\text{design}} / g)(\text{cm})$ 之重力式碼頭取 2，對於容許位移達 $20(a_{\text{design}} / g)(\text{cm})$ 者取 1.5，不容許有滑動位移者取 1.0。

影響滑動塊分析結果之敏感因素包括：評估臨界滑動加速度之方法與準確度，所採用地震加速度歷時之特性等。INA 的設計準則指出：由於滑動塊分析基於剛性地盤、壁體僅滑動而無傾斜、回填土楔型塊剛性運動等假設，應用時也需十分小心，一些研究顯示，若實際基礎土壤可能變形時，此方法計算結果可能遠遠低估實際壁體之位移量，而當基礎堅實但壁體可能發生扭動時，此法又可能過於保守，對於有可能液化之回填土，建議採用其他方法來計算。

5.2.3 動力分析法

重力式碼頭的動力分析法，一般可採用有限元素(finite element method, FEM)或有限差分(finite difference method, FDM)等數值方法，模擬「碼頭-基礎拋石」與「碼頭-背填材料」兩者結構土壤介面之滑動行

為，並考慮超額孔隙水壓激發對碼頭穩定性及變位之影響，以及土層之非彈性行為，利用具代表性之實際地震記錄作為輸入運動，進行非線性動力歷時數值分析，探討在所考量地震等級下，重力式碼頭結構之功能表現能否符合功能性目標，以評估其耐震能力。

以有限元素法(FEM)或有限差分法(FDM)進行土壤-結構互制動力分析，地震力由作用於分析模型中土壤-結構系統區域之基線(Base)的地震歷時來表示；剛性結構可模擬為線彈性；土壤可根據可能發生之應變等級採用(等效線性或非線性)總應力模型(Equivalent Linear/Total Stress)或非線性有效應力(Non-linear/Effective Stress)模型。日本 1999 年版設計基準也提到：考量土壤液化後，因孔隙水壓上升，致使土壤之有效應力減低，土壤之恢復力與阻尼特性的改變引起地盤反應變化，採用有效應力分析法可以計算土壤液化之孔隙水壓，通過有效應力變化去計算結構反應之變化。而總應力法無法計算土壤液化之孔隙水壓變化，當孔隙水壓超過某等級(通常孔隙水壓比為 0.5 或以上)，以總應力法計算之結果與實際結構耐震反應相差較大，但總應力法較簡便因此常被應用於工程實務，而有效應力分析法所得結果通常比總應力法來得小，所以，工程實務設計中採用總應力法分析得到之結果也較安全、保守。此類分析結果將包括整個系統之破壞型態與相關之位移、應力及應變狀態，由於該方法將土壤以有限元素模擬，所以，土壤液化不用單獨分析。

較典型的有限差分法應用軟體為二維與三維之非線性分析軟體 FLAC；較著名的有限元素法應用軟體為 FLUSH 與 PLAXIS 應用軟體。以下將簡介有限差分法程式 FLAC 以及有限元素程式 FLUSH 及 PLAXIS，將有助於使用者使用於重力式碼頭之動力分析原理。

1. FLAC 程式簡述

FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)程式為美國 Itasca Consulting Group, Inc.所發展，而 FLAC 程式是以外顯有限差分程式(Explicit Finite Difference Code)處理二維平面應變之數值分析問

題，以模擬土壤、岩石彈塑性或其他達降伏限度後成塑性流動的材料所組成的構造物行為，並將欲分析之物體分割成有限之網格，決定材料之組成律及邊界條件，若材料所遭受之應力場較大亦可能產生大變形，則需使用大應變模式模擬材料變形行為。另外，FLAC 另有 Fish(FLACish)程式可供使用者自行撰寫附加之副程式，以符合特殊材料及案例情況之需求。

FLAC 為顯性(explicit)有限差分程式，運算過程中是以「時階的型態」(Time-stepping Fashion)來求解網格中每一個節點的運動方程式，利用切的很小的時階，達到節點或元素(zone)之間訊息或變化不會傳給鄰近之節點或元素之假設，如此可看到整個系統的行為隨時間發展變化的過程。而在進行動態分析時需考慮在有限網格之波傳行為之影響，因此需加以考慮邊界折射與反射行為，且在進行模擬時也需考慮到應力波傳遞時的能量消散行為。而 FLAC 的 Dynamic Option 也提供了阻尼與吸能邊界。

2. FLUSH 程式簡述

FLUSH 程式係為美國加州大學 Berkerley 分校於 1975 年開發之動態有限元素程式，並於 1990 年開發 IBM-PC/AT 386 版本，該程式基本上為二維平面應變分析程式，其假設土壤為等值彈性體，並以傳導邊界(transmitting boundary)和黏滯邊界(viscous boundary)模擬水平向無限土壤之波傳能量消散的現象，且在第三方向應用黏滯阻尼盤，以減少自由場元素數量，減少運算時矩陣容量，提高分析運算速度，如此以近似三維模式模擬土壤結構系統，進行土壤結構互制分析。

程式運算係將所輸入地表面之控制運動(control motion)，經反摺積(Deconvolution)運算，得到基盤面運動，再以基盤運動為輸入運動，直接作用於分析有限元素網格底部，進行土壤-結構物互制作用分析運算。反摺積運算係假設地震波為水平剪力波，且在水平地層中以垂直於地層之方向做上下傳遞，故可以單向度波傳之理論予

以分析，其分析方法相同於 Shake 程式，亦以等線性疊代法之方式考慮之，即在每次疊代過程中，將土壤視為線性材料，選取對應於有效反覆應變(effective cyclic strain)之剪力模數和阻尼比代表土體之動力特性，並藉每一次疊代所得之有效反覆應變值，據以調整剪力模數與阻尼比，使之前後達到一定的容許誤差為止，如此可獲得合理之分析結果。

3. PLAXIS 程式簡述

PLAXIS 為一有限元素分析程式，於 1987 年在荷蘭公共工程與水源管理部 (Dutch Department of Public Works and Water Management) 的推動下，由荷蘭 Delft 科技大學完成初步的成果。此後由於程式不斷的發展並逐漸受到重視，因此 1993 年成立一家名為 PLAXIS BV 的公司，作進一步的研發與改良。PLAXIS 程式歷經了數次之修改與校正，並在相關之理論與技術上得到荷蘭 Delft 科技大學與德國 Stuguart 大學等多國學術研究單位的充分支援，所能分析問題之類型以及使用範圍甚為廣泛，PLAXIS 程式在數值分析上主要有以下之功能：

- (1) 可進行二維平面應變及三維軸向對稱分析。所使用之元素包括有二維平面元素、界面元素、梁元素及桿元素等。
- (2) 可分析之工程應用問題包括：深開挖問題、地錨及土釘結構分析、排樁、加勁擋土牆分析、隧道、路堤、土壩之穩定性問題、壓密及潛變問題、滲流問題、及基礎版構分析等各類型土壤結構互制問題。
- (3) 網格節點及邊界條件均為繪圖式輸入(CAD)，網格之建立為自動產生，並可調整疏密程度以配合分析時之精確性要求。
- (4) 提供之土壤應力-應變組成律有：Linear-elastic、Mohr-Coulomb、Modified Cam-clay、Soft-Soil、Hardening-Soil、Soft-Soil-Creep 等。
- (5) 可考慮土壤為排水或不排水之狀況，而水壓力則可為靜水壓狀態(hydrostatic)及穩態(steady state)等情況。

- (6) 採用 Arc-length control 技巧，使得計算破壞荷重較正確。可考慮大變形修正網格(updated mesh)之分析。

第六章 既有重力式碼頭功能性評估探討

近 50 年我國港埠的地震災害歷史紀錄並不多，本研究所收集到的資料主要包括民國 75 年的花蓮地震，造成蘇澳港 #3~#5 重力式沉箱碼頭發生滑動傾斜的情形，以及民國 88 年發生的 921 集集地震，造成臺中港 #1~#4A 重力式沉箱碼頭發生位移受損。由於 921 集集地震年代較近，相關研究及基本分析資料較齊全，且該地震造成臺中港重力式碼頭之損害也較嚴重，故本章以臺中港 1~4A 號重力式碼頭為案例，依據當初設計所採用之用途係數來推求碼頭之功能目標，再依第四章建議之三個地震力等級，及國際航海協會基準建議之功能性等級與可接受標準，如表 5-1 所示，配合所提供的耐震功能性評估方法，評估既有碼頭結構物之耐震功能。

6.1 案例基本條件

921 集集地震前臺中港 1~4A 號重力式碼頭之一般條件、自然條件、材料條件等基本設計資料，如下所示。

1. 一般條件

碼頭泊船噸位：50,000DWT

水深：EL. -13m

岸肩高程：EL. +6.2m

繫船柱能力：曲柱 45t

設計地震係數：0.15

超載：常時 3t/m^2 ，地震時 1.5t/m^2

2. 自然條件

潮位：H.W.L. EL.+4.6m

L.W.L. EL. +0.9m

背填料(水力回填部分) $\phi = 30^\circ$

3. 材料性質

(1)單位重量：

砂、小石子、塊石(乾)： $1.6t/m^3$

砂、小石子、塊石(濕)： $1.8t/m^3$

砂、小石子、塊石(飽和狀態)： $2.0t/m^3$

砂、小石子、塊石(水中)： $1.0t/m^3$

鋼筋混凝土： $2.5t/m^3$

(2)摩擦係數：

預鑄混凝土與塊石： $\tan \phi' = 0.6$

預鑄混凝土與卵石： $\tan \phi' = 0.5$

卵石與卵石： $\tan \phi' = 0.65$

(3)安全係數：

抗滑動： $F_{ss} \geq 1.0$ (地震時)

抗傾覆： $F_{so} \geq 1.1$ (地震時)

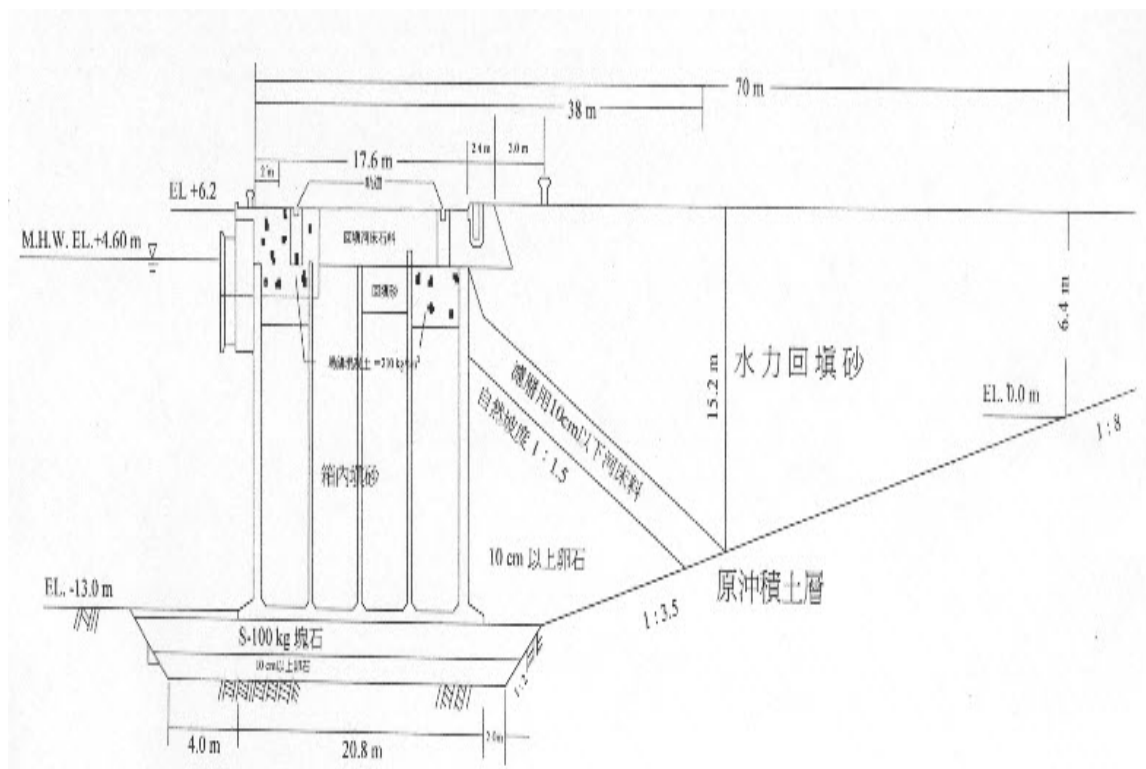


圖 6.1 臺中港 1~4A 號碼頭標準斷面圖

6.2 功能目標

選擇功能目標應針對港埠特性、結構物之功能考慮其所擔負之角色，在震災發生時，所應提供之功能，是作為緊急物質運送或維持地區經濟社會活動，亦或防災據點等，根據此功能之不同提出不同之選擇建議。

本研究之案例為已設計完成之構造物，國際航海協會所建議之功能性等級分為 S、A、B 與 C 四級如表 6-1 所示，此表結構物分類恰如港灣構造物設計基準所建議用途係數之結構物分類相同，所以本研究不依上述之功能目標選定原則確認本案例之功能目標，而是依據過去設計時所採用之重要度係數，查得構造物之分類，再由構造物之分類直接對應至國際航海協會所建議之功能性目標來檢核其功能是否滿足要求；經本研究查得本案例碼頭設計之重要度係數為 1，其對應表 6-2 之結構物分類為 B 級構造物，故本案例之功能目標，如表 6-3 所示。

表 6-1 國際航海協會構造物等級

構造物等級	構造物受地震作用之反應
S	1.地震後嚴重威脅人身安全 2.地震後需維持其使用功能 3.儲放危險性物質之構造物 4.地震後重創當地社經活動
A	具有 S 等級 1-4 項可能性，但不如其嚴重，或地震後難以修復還原者
B	除 S、A、C 等級以外者
C	容易修復者

資料來源：INA [2001]

表 6-2 港灣結構物之用途係數

結構物之分類	用途係數
特 定	1.5
A	1.2
B	1.0
C	0.8

資料來源：港灣構造物設計基準 [1997]

表 6-3 本案例選定之功能目標

地震力等級	損壞等級(功能性等級)			
	等級 I (可使用)	等級 II (可修復)	等級 III (接近崩塌破壞)	等級 IV (崩塌破壞)
Level 1 (迴歸期約 50 年)	B			
Level 2 (迴歸期約 475 年)			B	
Level 3 (迴歸期約 2500 年)				B

6.3 利用簡便分析法進行耐震功能性評估

本節採用國際航海協會針對港灣構造物所建議之基於力平衡概念的擬靜力分析法，進行耐震功能性的評估，將構造物及支承土壤視為剛體，地震力為施加於構造物側向的靜態慣性力，評估流程如圖 6.2 所示，相關說明如下：

6.3.1 Level 1(回歸期約 50 年)地震力檢核

因 50 年回歸期的地震力目前基準並未訂定，但由本研究第四章之探討結果，回歸期 50 年之地震力約為 475 年回歸期地震除以 3.25。本研究參考建築物耐震設計規範之臺灣地區震區短週期之設計水平譜加速度係數 S_s^D ，因本案例工址位於臺中市梧棲區，查得 $S_s^D = 0.7$ ，考慮震區工址之地盤效應，依其工址之平均 SPT $N=15$ ，由建築物耐震設計規範之地盤分類表屬第二類地盤，並查得短週期結構之工址放大係數 $F_a=1$ ，計算 $S_{DS} = F_a \cdot S_s^D = 1 \times 0.7 = 0.7$ ，因本案例碼頭結構基本週期趨近於零，依第三章基準規定 $S_{aD}=0.4S_{DS}$ ，地震水平作用力 $V_h = \frac{S_{aD}I}{1.2\alpha_y}W = \frac{S_{DS}I}{3\alpha_y}W = \frac{S_{DS}I}{3\alpha_y}W = K_h W$ ，計算得 475 年回歸期水平設計震度(K_h)為 0.23。故 50 年回歸期水平設計震度(K_h)為 $0.23/3.25=0.072$ ，考量垂直地震力影響，設計震度 $K(K=K_h/(1-K_h/2))$ 經計算為 0.075。相關碼頭穩定性安全係數計算如下所示：

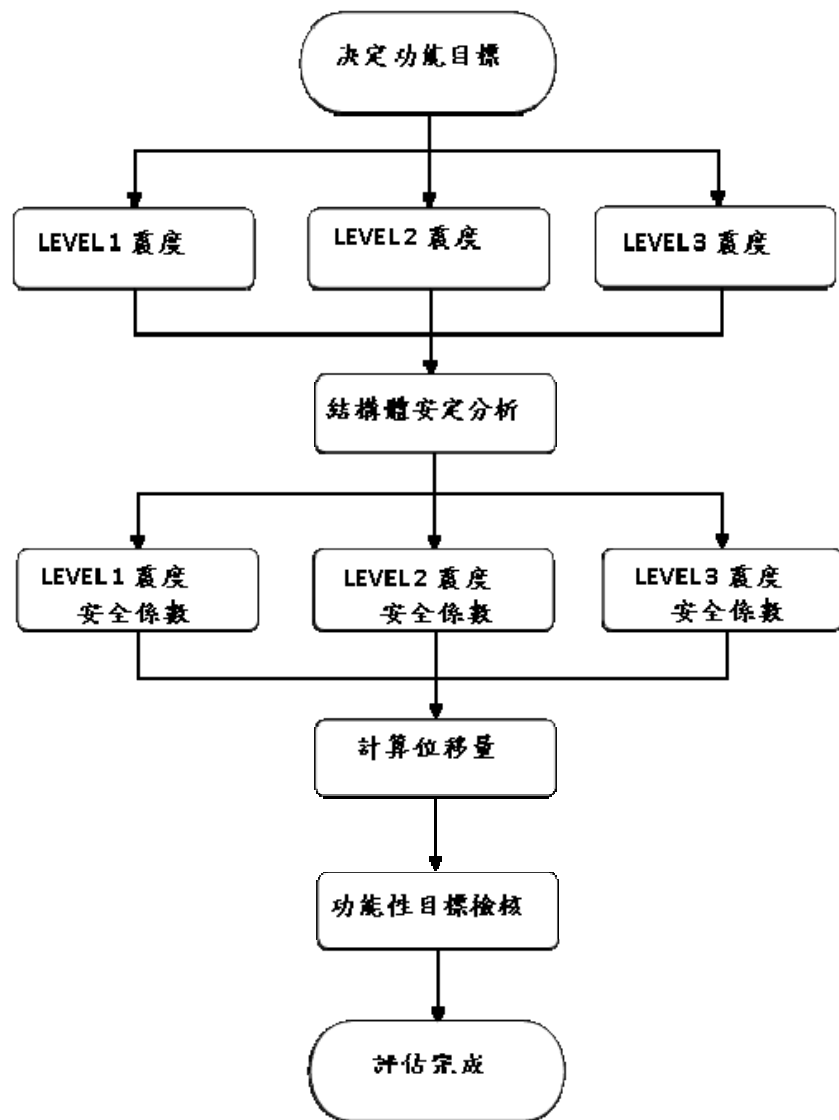


圖 6.2 重力式碼頭耐震功能性簡便分析法評估流程圖

1. 計算殘留水位(R.W.L.)

$$R.W.L. = \frac{1}{3}(H.W.L. - L.W.L.) + L.W.L.$$

$$= \frac{1}{3}(4.6 - 0.9) + 0.9 = 2.13m$$

2. 推估主動破壞面與水平面之夾角 α_{ae}

$$\alpha_{ae} = \phi' + \tan^{-1} \left[\frac{-\tan \phi' + \tan \phi' (\tan \phi' + \cot \phi') (1 + \tan \delta \cot \phi')}{1 + \tan \delta (\tan \phi' + \cot \phi')} \right] \dots\dots\dots (6.1)$$

背填卵石與卵石間之摩擦角，由摩擦係數 $\tan\phi'=0.65$ 反推 $\phi'=33^\circ$ ；由基準得知壁體與背填間的摩擦角 $\delta=15^\circ$ ；由式(6.1)計算結果 $\alpha_{ae}=74.71^\circ=74.71^\circ\cong 75^\circ$ ，因此得知主動破壞面與壁體夾角為 $90^\circ-\alpha_{ae}=15^\circ$ 。

3. 計算背填部分之等值摩擦角 ϕ_{eq} ，與等值單位重 γ_{eq}

圖 6.1 碼頭斷面圖中濾層河床料之摩擦角約為 30° ，自然坡度約為 1(垂直)：1.5(水平)的比例；圖 6.3 為計算背填土等效單位重與等效摩擦角之示意圖，(a)為背填土楔行塊幾何示意圖，圖中方框內之數字為實線所圍之該區面積，(b)為原始單位重值，(c)為計算後之等效參數值，等效摩擦角 ϕ_{eq} 由主動破壞面內背填部分之土壤摩擦角，分別對應該區體積求得，同樣的，等效單位重 γ_{eq} 由主動破壞面內之土壤單位重，對應其體積換算求得：

(1) 等效摩擦角 ϕ_{eq} ：

$$\phi_{eq} = \frac{23.716 \times 30 + 27.7513 \times 33}{23.716 + 27.7513} = 31.62^\circ$$

(2) 等效單位重 γ_{eq} ：

$$\begin{aligned}\gamma_{eq} &= \gamma_{wet} \left[1 - \left(\frac{H_{sub}}{H} \right)^2 \right] + \gamma_b \left(\frac{H_{sub}}{H} \right)^2 \\ &= 1.8 \times \left[1 - \left(\frac{15.53}{19.6} \right)^2 \right] + 1 \times \left(\frac{15.53}{19.6} \right)^2 = 1.30 t/m^3\end{aligned}$$

γ_b 為土壤在水中之單位重 ($=\gamma_{sat}-\gamma_w$)， γ_{wet} 為潮濕土壤之單位重， γ_{sat} 為飽和土壤之單位重， H 為碼頭高度， H_{sub} 為殘留水位之高度， H_{sur} 為殘留水位至碼頭頂之高度。

q_{sur} ：地震時之超載

地震合成角 $\psi = \tan^{-1} k' = 6.09^\circ$

因此可得地震主動土壓係數 K_{ae}

$$\begin{aligned} K_{ae} &= \frac{\cos^2(\phi_{eq} - \psi)}{\cos\psi \cos(\psi + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_{eq} + \delta) \sin(\phi_{eq} - \psi)}{\cos(\psi + \delta)}} \right]^2} \\ &= \frac{\cos^2(31.62^\circ - 12.13^\circ)}{\cos\psi \cos(12.13^\circ + 15^\circ) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(31.62^\circ + 15^\circ) \sin(31.62^\circ - 12.13^\circ)}{\cos(12.13^\circ + 15^\circ)}} \right]^2} \\ &= 0.35 \end{aligned}$$

ϕ_{eq} 為等效摩擦角； $\delta = 15.0^\circ$ ，為壁體與背填間的摩擦角

主動土壓 P_{ae} ：

$$\begin{aligned} P_{ae} &= K_{ae} \times \frac{1}{2} \left(\gamma_{eq} + \frac{q_{sur}}{H} \right) H^2 \\ &= 0.35 \times \frac{1}{2} \left(1.30 + \frac{1.5}{19.6} \right) \times 19.6^2 = 93.11t/m \end{aligned}$$

所以此時地震力給予壁體一個與水平夾 15° 之力量，其大小為 $89.94t/m$ ，若將其分為水平與垂直分力來看，令碼頭前趾為參考點 A，則可得下列結果：

$$\text{垂直分力：} P_{ae} \sin 15^\circ = 24.10t/m$$

作用於壁體與背填部分之交界，也就是距離 A 點 $19.10m$ 處

$$\text{水平分力：} P_{ae} \cos 15^\circ = 89.94t/m$$

作用於 $EL. -13.4m$ 以上 $8.82m (= 0.45H)$ 處

5. 計算地震時動水壓 P_{dw}

$$P_{dw} = \frac{7}{12} k \gamma_w H_w^2$$

$$\gamma_w : \text{海水單位重} = 1.03t/m^3$$

$$H_w : \text{潮位深度} = 14.3m$$

$$P_{dw} = \frac{7}{12} \times 0.075 \times 1.03 \times 14.3^2 = 9.15t/m$$

作用於 $EL.-13.4m$ 以上 $5.72m (= 0.4H_w)$ 處，此處動水壓乃由

$$P_{dw} = \frac{7}{8} k \gamma_w \sqrt{H_w \cdot h} \quad , \quad h \text{ 由 } 0 \text{ 積分至 } H_w \text{ 所得。}$$

6. 計算結構慣性力

結構慣性力分為堤面、沉箱、基腳三部分，其中沉箱與基腳部分之單位重以等值單位重來近似，計算如下：

$$\gamma = (\text{RC 單位重} \times \text{RC 單位寬度體積} + \text{sand 單位重} \times \text{sand 單位寬度體積}) / \text{總單位寬度體積}$$

$$= \frac{2.5 \times 46.24 + 2.0 \times 270}{46.24 + 270} = 2.073t/m^3$$

(1) 堤面：[堤面單位寬度體積] $\times$ 堤面單位重 $\times$ 地震係數

$$[17.6 \times (6.2 - 4.5)] \times 1.8 \times 0.075 = 4.01t/m$$

$$\text{作用於 } EL.-13.4m \text{ 以上 } 18.75m \left(= 4.5 - (-13.4) + \frac{6.2 - 4.5}{2} \right) \text{ 處}$$

(2) 沉箱：[沉箱單位寬度體積] $\times$ 沉箱單位重 $\times$ 地震係數

$$[17.6 \times 17.5] \times 2.07 \times 0.075 = 47.48t/m$$

$$\text{作用於 } EL.-13.4m \text{ 以上 } 9.15m \left(= \frac{4.5 - (-13.0)}{2} + 0.4 \right) \text{ 處}$$

(3)基腳：[基腳單位寬度體積]×基腳單位重×地震係數

$$[20.6 \times 0.4] \times 2.07 \times 0.075 = 1.27 t/m$$

作用於 $EL.-13.4m$ 以上 $0.20m \left(= \frac{0.4}{2} \right)$ 處

7. 計算背填土之推力與繫船柱之拉力

背填土有飽和與不飽和的部分，因此以等值單位重來近似，計算如下：

背填土：[背填土單位寬度體積]×背填土單位重×地震係數

$$\gamma_{backfill} = \frac{6.105 \times 1.8 + 22.695 \times 2.0}{6.105 + 22.695} = 1.957 t/m^3$$

則背填土之推力為 $[1.5 \times 19.2] \times 1.957 \times 0.075 = 4.20 t/m$

作用於 $EL.-13.4m$ 以上 $10m \left(= \frac{6.2 - (-13.0)}{2} + 0.4 \right)$ 處

8. 計算結構本身以及背填土垂直向下之穩定力量(含垂直震度影響)

結構本身分為堤面、沉箱、基腳三個部分討論，表示如下：

(1)堤面：[堤面單位寬度體積]×堤面單位重× $(1-K_h/2)$

$$[17.6 \times (6.2 - 4.5)] \times 1.8 \times \left(1 - \frac{0.072}{2} \right) = 51.92 t/m$$

作用於參考點 A 之右方 $10.30m \left(= 1.5 + \frac{17.6}{2} \right)$ 處

(2)沉箱：[沉箱單位寬度體積]×沉箱單位重× $(1-K_h/2)$

殘留水位以上部分：

$$\left[17.6 \times \frac{(2.37 + 3.6)}{2} \right] \times 2.073 \times \left(1 - \frac{0.072}{2} \right) = 105 t/m$$

作用於參考點 A 之右方 $9.70m$ 處

其中

$$9.70 = 1.5 + \frac{17.6 \times (4.5 - 0.9) \times \frac{1 \times (17.6)}{3} + 17.6 \times (4.5 - 2.13) \times \frac{2 \times (17.6)}{3}}{17.6 \times ((4.5 - 0.9) + (4.5 - 2.13))}$$

殘留水位以下部分：

$$\left[17.6 \times \frac{(13.9 + 15.13)}{2} \right] \times (2.073 - 1.0) \times \left(1 - \frac{0.072}{2} \right) = 264.27 t/m$$

作用於參考點 A 之右方 10.42m 處

$$10.42 = 1.5 + \frac{17.6 \times (0.9 - (-13.0)) \times \frac{1 \times (17.6)}{3} + 17.6 \times (2.13 - (-13.0)) \times \frac{2 \times (17.6)}{3}}{17.6 \times ((0.9 - (-13.0)) + (2.13 - (-13.0)))}$$

(3) 基腳：[基腳單位寬度體積]×基腳單位重×(1-Kh/2)

$$[20.3 \times 0.4] \times (2.073 - 1.0) \times \left(1 - \frac{0.072}{2} \right) = 8.4 t/m$$

作用於參考點 A 之右方 $10.30m \left(= 1.5 + \frac{17.6}{2} \right)$ 處

背填土：[背填土單位寬度體積]×背填土單位重×(1-Kh/2)

殘留水位以上部分：

$$[1.5 \times 4.07] \times 1.8 \times \left(1 - \frac{0.072}{2} \right) = 10.60 t/m$$

作用於參考點 A 之右方 $19.85m \left(= 1.5 + 17.6 + \frac{1.5}{2} \right)$ 處

殘留水位以下部分：

$$[1.5 \times 15.13] \times 1.0 \times \left(1 - \frac{0.072}{2} \right) = 21.88 t/m$$

作用於參考點 A 之右方 $19.85m \left(= 1.5 + 17.6 + \frac{1.5}{2} \right)$ 處

9. 計算殘留水壓與上揚力

$$\text{殘留水壓} : \frac{1}{2}(2.13-0.9)^2 \times 1.03 = 0.78t/m$$

作用於 $EL.-13.4m$ 以上

$$14.71m \left(= 2.13 - (-13.4) - \frac{2}{3}(2.13 - 0.9) \right) \text{ 處}$$

$$[0.9 - (-13.4)] \times (2.13 - 0.9) \times 1.03 = 18.12 t/m$$

作用於 $EL. -13.4m$ 以上 $7.15m \left(= \frac{0.9 - (-13.4)}{2} \right)$ 處

$$\text{上揚力} : \frac{1}{2}(2.13-0.9) \times (1.5+17.6+1.5) \times 1.03 = 13.05 t/m$$

作用於參考點 A 之右方 $13.73m \left(= \frac{2}{3} \times (1.5 + 17.6 + 1.5) \right)$ 處

以上步驟所計算之作用於結構的力量，其大小、位置與方向皆標示於圖 6.4 地震時作用於結構之力量示意圖。

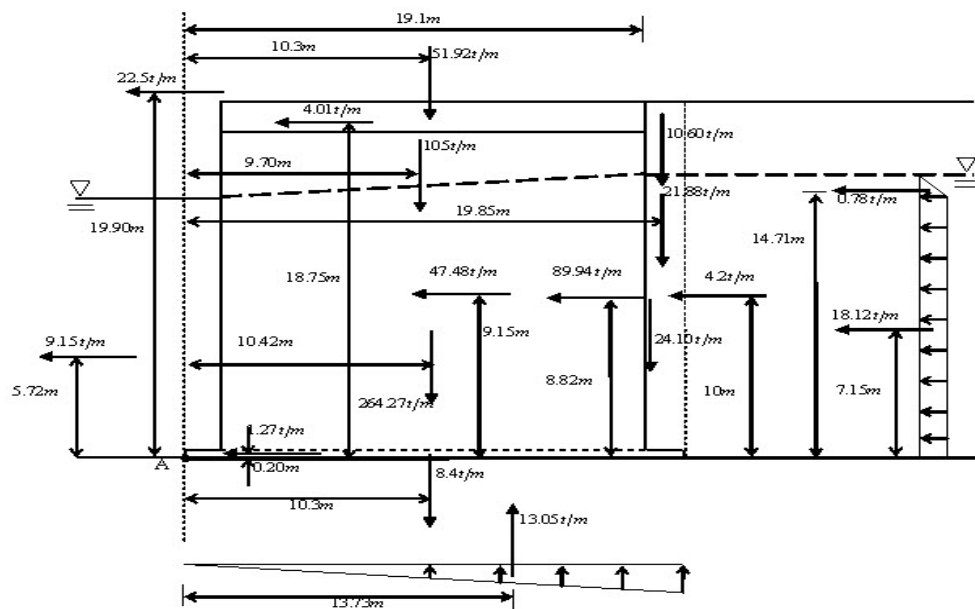


圖 6.4 地震時作用於結構之力量示意圖

在分別計算影響結構穩定性之所有力量後，由力平衡觀點估算結構抗滑動與抗傾覆之安全係數，如下：

穩定力	力量(t/m)	作用位置(m)	對 A 點力矩(t-m/m)
主動土壓垂直分力	24.10	19.1	460.29
堤面垂直向下之穩定力量	51.92	10.3	534.80
沉箱垂直向下之穩定力量 (殘留水面以上)	105.00	9.7	1018.48
沉箱垂直向下之穩定力量 (殘留水面以下)	264.27	10.42	2753.72
基腳垂直向下之穩定力量	8.40	10.3	86.52
背填土垂直向下之穩定力量 (殘留水面以上)	10.60	19.85	210.30
背填土垂直向下之穩定力量 (殘留水面以下)	21.88	19.85	434.32
上揚力	-13.5	-	-
總合	473.12	-	5498.43

作用力	力量(t/m)	作用位置(m)	對 A 點力矩(t-m/m)
主動土壓水平分力	89.94	8.82	793.26
動水壓	9.15	5.72	52.34
堤面慣性力	4.01	18.75	75.20
沉箱慣性力	47.48	9.15	434.42
基腳慣性力	1.27	0.2	0.25
背填土之推力	4.20	10	41.97
繫船柱拉力	22.5	19.9	447.75
殘留水壓	0.78	14.71	11.46
殘留水壓	18.12	7.15	129.53
總合力	197.44	-	-
上揚力	13.5	13.73	179.16
總合力矩	-	-	2165.35

由以上計算可得知構造物在回歸期 50 年地震力作用下，具有抗滑動之安全係數 $F_{ss} = 4.73.12 \times 0.6 / 197.44 = 1.44$ (其中 0.6 為壁體與基礎接觸面之摩擦係數，即預鑄混凝土與塊石之摩擦係數)，抗傾覆之安全係數 $F_{so} = 5498.43 / 2165.35 = 2.54$ 。因安全係數均大於基準要求，故結構穩定不會產生任何變位。檢核結果屬於表 5-1 重力式碼頭第 I 級的功能性水準，也符合表 6-3 中 B 級結構物在 Level 1 地震力等級的功能目標。

6.3.2 Level2(回歸期約 475 年)地震力檢核

由前面小節計算得 475 年回歸期水平設計震度(Kh)為 0.23，考慮垂直震度的影響，評估的震度係數 $K = K_h / (1 - K_h) = 0.264$ 。重複步驟(d)~(j)，分別計算影響結構穩定性之所有力量後，由力平衡觀點估算結構抗滑動與抗傾覆之安全係數，如下：

穩定力	力量(t/m)	作用位置(m)	對 A 點力矩(t-m/m)
主動土壓垂直分力	45.78	19.1	874.32
堤面垂直向下之穩定力量	46.74	10.3	481.45
沉箱垂直向下之穩定力量 (殘留水面以上)	94.52	9.7	916.88
沉箱垂直向下之穩定力量 (殘留水面以下)	237.91	10.42	2479.01
基腳垂直向下之穩定力量	7.56	10.3	77.89
背填土垂直向下之穩定力量 (殘留水面以上)	9.54	19.85	189.32
背填土垂直向下之穩定力量 (殘留水面以下)	19.70	19.85	391.00
上揚力	-13.5	-	-
總合	448.70	-	5409.87

作用力	力量(t/m)	作用位置(m)	對 A 點力矩(t-m/m)
主動土壓水平分力	170.84	8.82	1506.80
動水壓	32.45	5.72	185.64
堤面慣性力	14.23	18.75	266.74
沉箱慣性力	168.41	9.15	1540.97
基腳慣性力	4.50	0.2	0.90
背填土之推力	14.89	10	148.88
繫船柱拉力	22.50	19.9	447.75
殘留水壓	0.21	14.71	3.03
殘留水壓	4.79	7.15	34.22
總合力	432.82	-	-
上揚力	13.5	13.73	179.16
總合力矩	-	-	4314.09

由以上計算可得知構造物在回歸期 475 年地震力作用下，具有抗滑動之安全係數 $F_{ss} = 448.70 \times 0.6 / 432.82 = 0.62$ (其中 0.6 為壁體與基礎接觸面之摩擦係數，即預鑄混凝土與塊石之摩擦係數)，抗傾覆之安全係數 $F_{so} = 5409.87 / 4314.09 = 1.25$ 。依據表 5-3 之經驗公式可得到構造物之最大水平位移 $d=54.51\text{cm}$ ，沉陷量 $s=18.33\text{cm}$ ，正規化水平位移 $d/H=7.82\%$ ，檢核結果屬於表 5-1 重力式碼頭第Ⅲ級的功能性水準，也符合表 6-3 中 B 級結構物在 Level 2 地震力等級的功能目標。

6.3.3 Level3(回歸期約 2500 年)地震力檢核

因本案例工址位於臺中市梧棲區，查得 $S_s^M = 0.9$ ，計算 $S_{MS} = F_a \cdot S_s^M = 1 \times 0.9 = 0.9$ ，因本案例碼頭結構基本週期趨近於零，依第三章基準規定 $S_{aM} = 0.4S_{MS}$ ，地震水平作用力 $V_h = \frac{S_{aD}I}{1.2\alpha_y}W = \frac{S_{DS}I}{3\alpha_y}W = K_h W$ ，計算得 2500 年回歸期水平設計震度(K_h)為 0.3，考慮垂直震度的影響，評估的震度係數 $K = K_h / (1 - K_h) = 0.353$ 。重複步驟(d)~(j)，分別計算影響結構穩定性之所有力量後，由力平衡觀點估算結構抗滑動與抗傾覆之安全係數，如下：

穩定力	力量(t/m)	作用位置(m)	對 A 點力矩(t-m/m)
主動土壓垂直分力	73.43	19.1	1402.62
堤面垂直向下之穩定力量	44.35	10.3	456.83
沉箱垂直向下之穩定力量 (殘留水面以上)	89.69	9.7	869.98
沉箱垂直向下之穩定力量 (殘留水面以下)	225.74	10.42	2352.21
基腳垂直向下之穩定力量	7.18	10.3	73.90
背填土垂直向下之穩定力量 (殘留水面以上)	9.05	19.85	179.64
背填土垂直向下之穩定力量 (殘留水面以下)	18.69	19.85	371.00
上揚力	-13.5	-	-
總合	455.08	-	5706.18

作用力	力量(t/m)	作用位置(m)	對 A 點力矩(t-m/m)
主動土壓水平分力	274.07	8.82	2417.27
動水壓	43.36	5.72	248.04
堤面慣性力	19.01	18.75	356.40
沉箱慣性力	225.02	9.15	2058.94
基腳慣性力	6.02	0.2	1.20
背填土之推力	19.89	10	198.92
繫船柱拉力	22.50	19.9	447.75
殘留水壓	0.28	14.71	4.05
殘留水壓	6.39	7.15	45.72
總合力	616.54	-	-
上揚力	13.5	13.73	179.16
總合力矩	-	-	5957.45

由以上計算可得知構造物在回歸期 2500 年地震力作用下，具有抗滑動之安全係數 $F_{ss} = 455.08 \times 0.6 / 616.54 = 0.44$ (其中 0.6 為壁體與基礎接觸面之摩擦係數，即預鑄混凝土與塊石之摩擦係數)，抗傾覆之安全係數 $F_{so} = 5706.18 / 5957.45 = 0.96$ 。依據表 5-3 之經驗公式可得到構造物之最大水平位移 $d=77.20\text{cm}$ ，沉陷量 $s=27.89\text{cm}$ ，正規化水平位移 $d/H=11.60\%$ ，檢核結果屬於表 5-1 重力式碼頭第 IV 級的功能性水準，也符合表 6-3 中 B 級結構物在 Level 3 地震力等級的功能目標。

依據簡便分析法評估的結果顯示，臺中港#1~#4 碼頭在不考慮土壤液化之情況下，功能性檢核結果符合 B 級結構物之功能目標。

6.4 利用簡便動力分析法進行耐震功能性評估

重力式碼頭之簡便動力分析法乃運用於 B、C 等級結構之細部設計，或 S、A 等級之初步設計之檢核評估，利用滑動塊體法，將碼頭結構本體理想化為一會滑動之剛體，地震力以作用於結構體基礎之地震歷時表示，塊體在受地震力作用時會因慣性力而有向外滑移之趨勢，當此滑移之驅動力大於滑動面之極限抗剪力時，塊體會有滑動的情況產生，此時之加速度為臨界滑動加速度，將地表加速度大於臨界滑動加速度的部分雙重積分，可得到構造物之滑動位移量，即可檢核碼頭是否達到預期之功能目標，評估流程如圖 6.5 所示。

本研究首先推估結構之臨界滑動加速度 a_t 。依據 6.3.1 小節的計算步驟，增加震度值直至構造物之臨界穩定狀態，也就是 $F_{ss} < 1.0$ 或 $F_{so} < 1.0$ 時，取其震度換算為加速度即為臨界滑動加速度 a_t ，經計算得 $a_t = 140gal$ 。

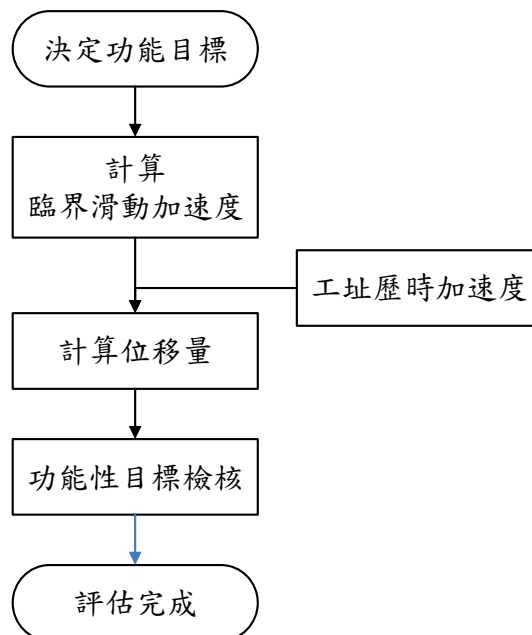


圖 6.5 重力式碼頭簡便動力分析評估流程圖

因基準規定輸入檢核之模擬地震歷時紀錄須與反應譜相符，且應能確切反應工址設計地震(或最大考量地震)之地震規模、斷層距離與震源效應。由於本研究目前尚無能力製作各地震等級之模擬地震歷時紀錄，故此部分本研究僅能以 921 集集地震所實際量測得到的地震歷時紀錄，來評估碼頭可能產生的變位來說明重力式碼頭簡便動力分析方法的應用。又由於當時臺中港並無相關地震監測站，故本研究僅能以距離臺中港最近的清水國小測站，於 921 集集地震時量測得到最大之南北向歷時記錄(如圖 6.6 所示)來評估，由圖 6.6 之地震歷時記錄值可知最大加速度為 $162gal$ ，評估碼頭之初始滑動加速度 $a_i = 140gal$ 小於記錄值，因此推估結構體滑動位移量為 0.01 公尺，如圖 6.7 所示。但以上皆為假設沒有土壤液化現象之前提下得到的分析結果，與臺中港 921 地震#1~#4 碼頭產生 0.5m~1.6m 之滑動位移量有明顯的差異，顯示重力式碼頭若背填土壤可能發生土壤液化而評估時未考慮，可能會嚴重低估結構損壞程度，故未來重力式碼頭之功能性設計或評估應將土壤液化因素納入考量。

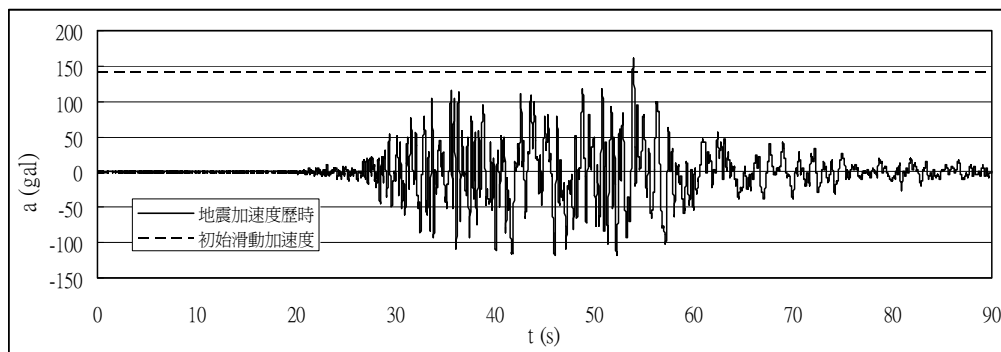


圖 6.6 TCU059 清水國小於 921 集集地震之歷時記錄(南北向)

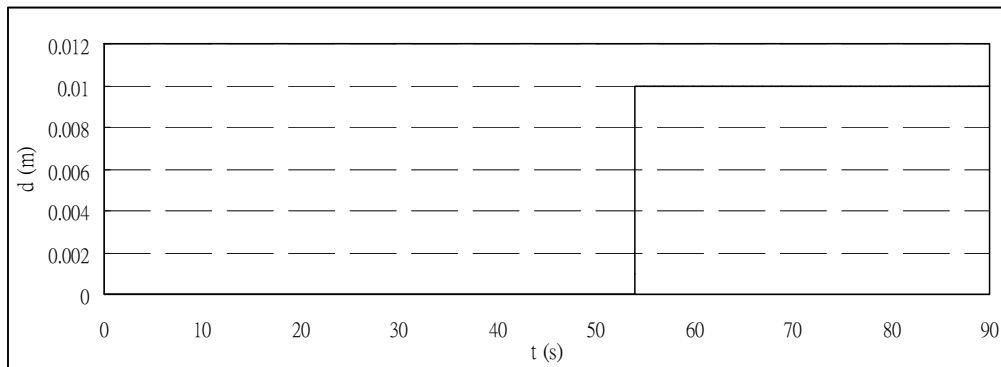


圖 6.7 未考慮液化因素之碼頭滑動量分析結果

6.5 利用動力分析法進行耐震功能性評估

由第五章的介紹可知，碼頭結構物的動力分析法一般可採用有限元素(finite element method, FEM)或有限差分(finite difference method, FDM)等數值方法，模擬「碼頭-基礎拋石」與「碼頭-背填材料」兩者結構土壤介面之滑動行為，並考慮超額孔隙水壓激發對碼頭穩定性及變位之影響，以及土層之非彈性行為，利用具代表性之實際地震記錄作為輸入運動，進行非線性動力歷時數值分析，探討在所考量地震等級下，碼頭結構之功能表現能否符合功能性目標，以評估其耐震能力。

本研究考量本所擁有軟體及相關文獻研究的成果，評估結果決定採用有限差分法應用軟體 FLAC 來進行重力式碼頭的動力耐震能力評估。

本案例參考李佳翰(2001)對臺中港 1 至 4A 碼頭受 921 地震後之土壤液化研究所建立之 FLAC 模型，做適度的改良與修正(包括自由場邊界、考慮動態水壓力、基底邊界由剛性修正為柔性邊界及動態荷重改以剪應力波施加之機制等)，以 FLAC 6.0 版本對臺中港沉箱式碼頭在地震作用下，考慮靜態力學平衡、孔隙水壓的激發模式(Finn and Byrne model)、考慮動態水压力的影響(Westergaard, 1931)、以材料阻尼(Rayleigh damping)模擬土體受擾動時的應變吸能情形、以自由場邊界(free-field boundaries)模擬無限空間之波傳行為、以動態吸能邊界(quiet boundary)模擬柔性基底(flexible base)、動態荷重(如剪應力波)施加之機制，並進行土壤有效應力數值分析，以模擬沉箱式碼頭受地震引致土壤液化之情形。

由於本研究目前尚無能力製作各地震等級之模擬地震歷時記錄，故此部分本研究僅能以 921 集集地震所實際量測得到的地震歷時紀錄，來評估碼頭可能產生的變位來說明重力式碼頭動力分析方法的應用。相關評估步驟說明如下：

1. 設定初始建模環境

執行 FLAC 程式的圖形操作界面，並設定 FLAC-GIIC 的初始作業環境，如圖 6.8~圖 6.9 所示。

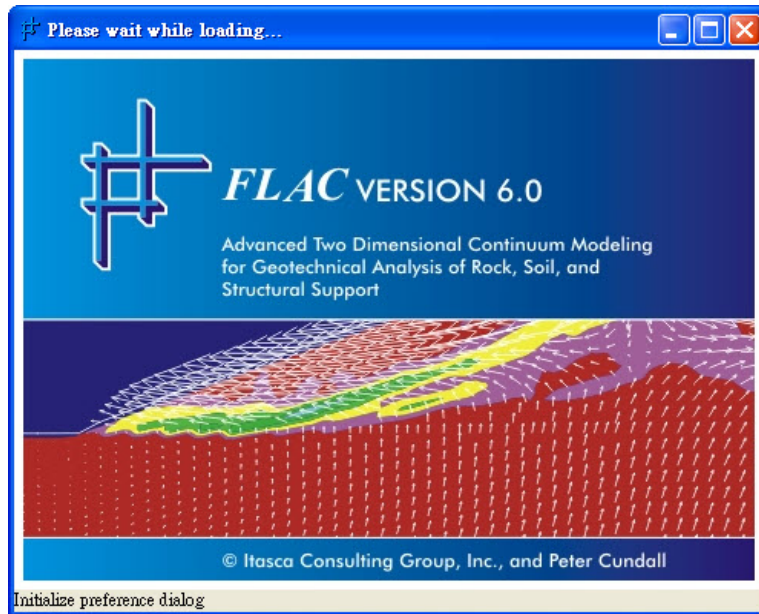


圖 6.8 FLAC 程式之圖形操作界面啟動畫面

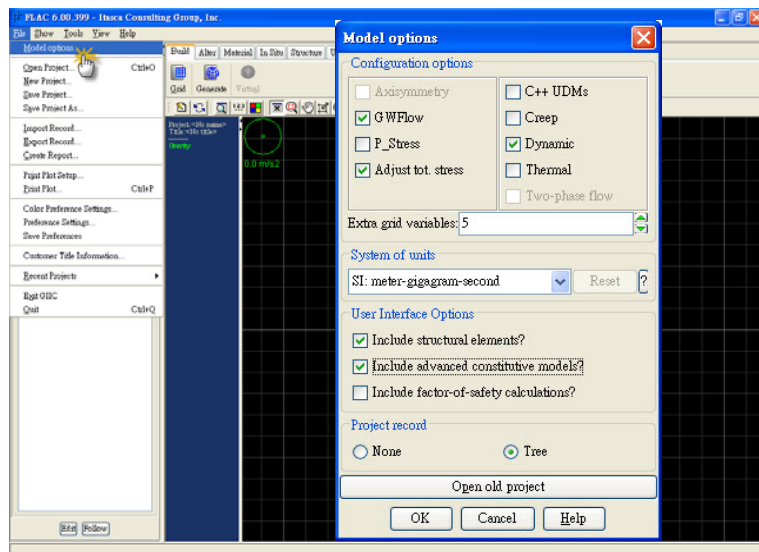


圖 6.9 設定 FLAC-GIIC 的初始作業環境

2. 建立碼頭模型網格

本案例係依照臺中港 1 至 4 號重力沉箱式碼頭設計斷面圖(如圖 6.1 所示)建立模型網格。網格數為橫向 20 格及縱向 40 格所組成，模擬範圍為長 100m 及高 40m，背填區涵蓋 50m，並將網格分背填卵礫石、背填砂及底部土壤等三區，如圖 6.10 所示。

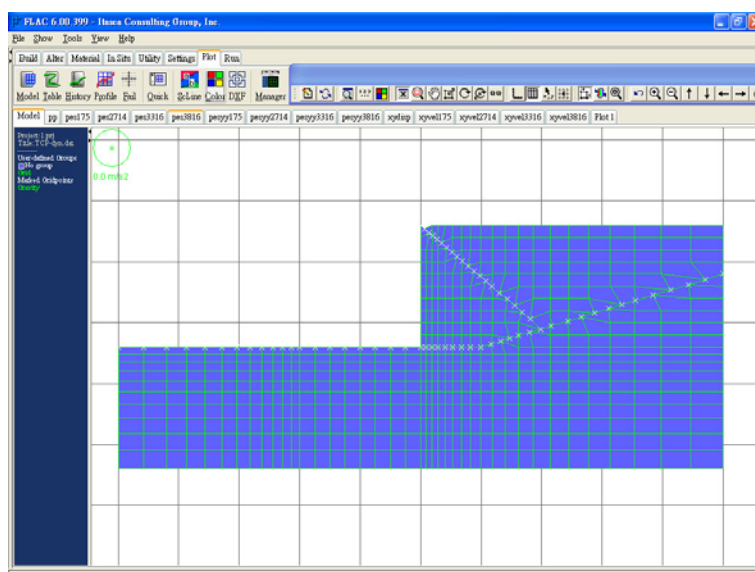


圖6.10 臺中港數值模擬網格圖

3. 設定材料參數及靜態邊界條件

分別給予背填卵礫石、背填砂及底部土壤等三區不同之材料參數並利用指令加以檢核；而動態邊界條件則為固定左右兩邊土層，只允許縱向變位；底部固定，只允許橫向變位；上部則為自由邊界，如圖 6.11~圖 6.13 所示。表 6-4 則為本案例數值模擬所採用之材料強度參數表。

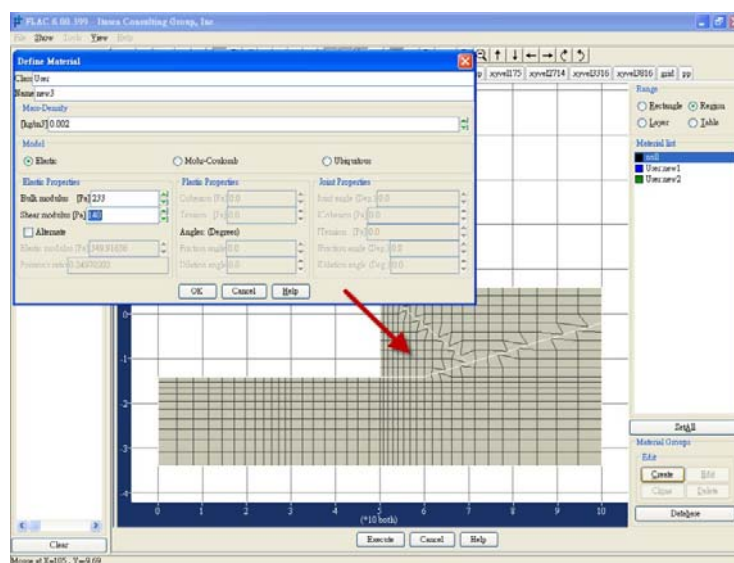


圖6.11 設定各區材料參數

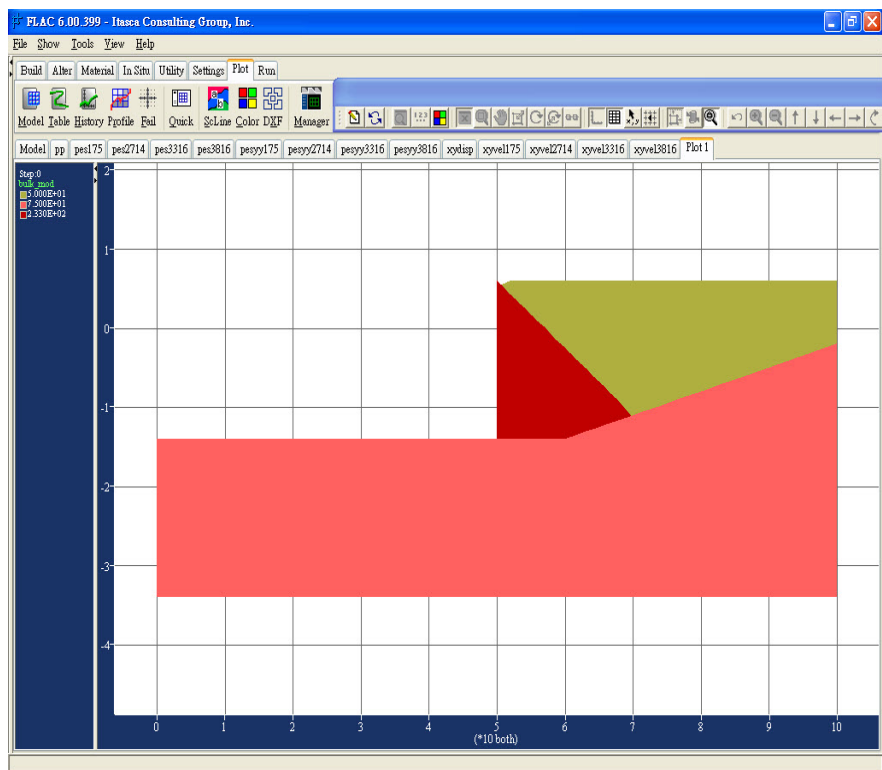


圖6.12 以體積模數分佈圖檢核三區不同之土體

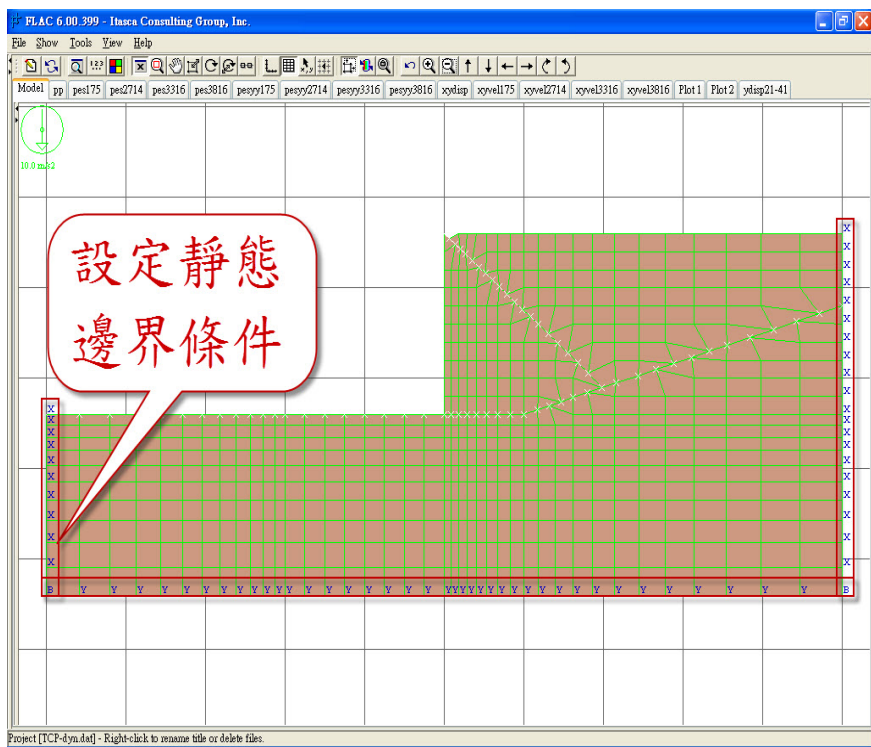


圖6.13 設定靜態邊界條件

表6-4 臺中港數值模擬之材料強度參數表

部 位	剪力模數 (MPa)	體積模數 (MPa)	密度 (106kg/m ³)	c (MPa)	 (□)	孔隙率	滲透係數 (106m/s)
背填砂	20~40	33~67	0.0018	0	30	0.3	1×10^{-8}
卵礫石	140	233	0.002	0	35	0.5	1×10^{-7}
底部土壤	40~80	67~133	0.0018	0.05	33	0.3	1×10^{-8}
沉箱之混凝土	0.8×10^4	1×10^4	0.002	—	—	—	—

資料來源：李佳翰[2001]

4. 建立沉箱網格及添加材料界面

建立一尺寸高 20m；寬 20m 之沉箱網格模型，為使沉箱與背填卵礫石及基礎卵礫石之間能產生錯移或分離等現象，於沉箱與上述兩處間，分別加入材料界面 (Interface)，如圖 6.14 所示。表 6-5 則為材料界面所輸入之參數表。

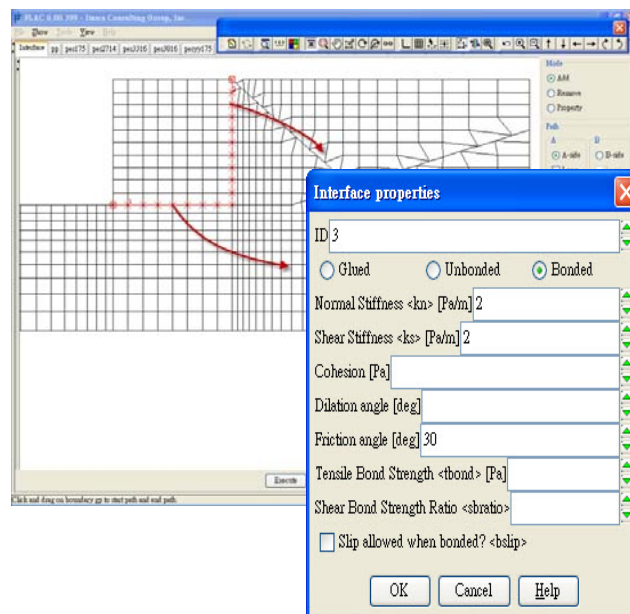


圖6.14 設定沉箱與土體間之材料界面(Interface)參數

表6-5 臺中港數值模擬之界面元素參數表

部 位	正向勁度 (MPa)	切向勁度 (MPa)	界面摩擦角 ($^{\circ}$)
沉箱與背填卵礫石間	2	2	15
沉箱與基礎卵礫石間	2	2	30

資料來源：李佳翰[2001]

5. 進行重力力學平衡計算

先給予重力，使土體自然產生初始應力，並進行重力力學計算以達到平衡，如圖 6.15 所示。

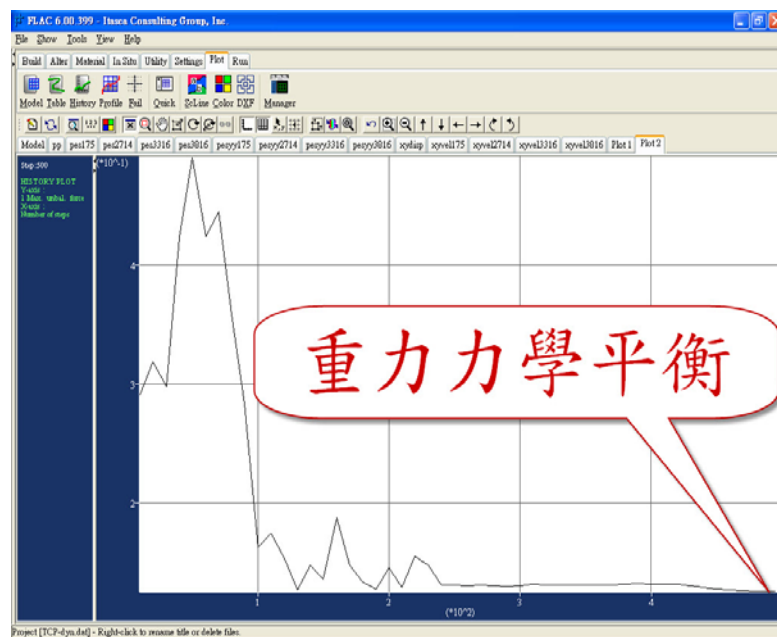


圖6.15 進行重力力學計算達到平衡狀態

6. 施加靜水壓力並指定土體中之飽和面

施加側向靜水壓力；地下水位為地表下 4m 處，指定土體中及自由面上之飽和面，並進行飽和面以下的土體達滲流平衡之計算，如圖 6.16~圖 6.18 所示。

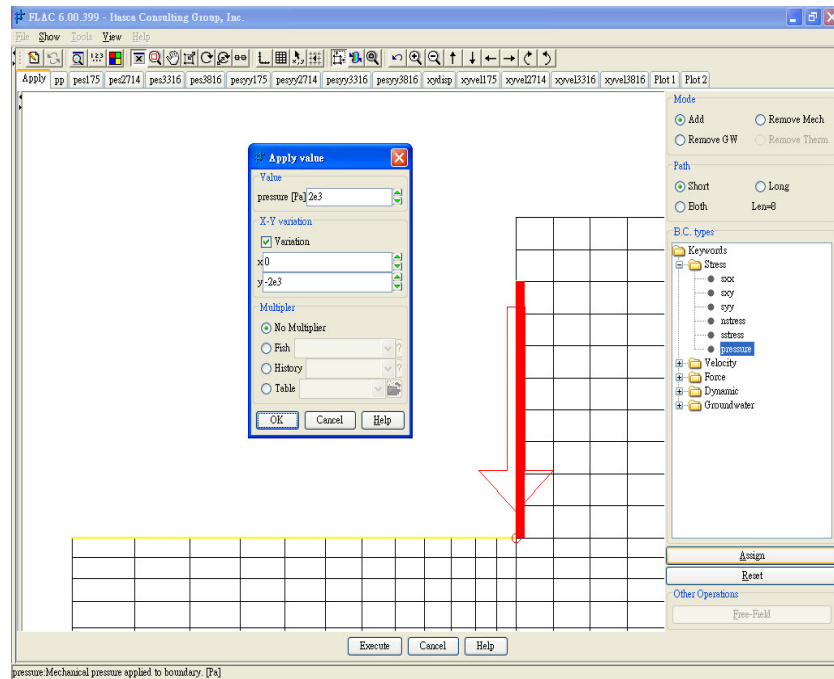


圖6.16 進行重力力學計算達到平衡狀態

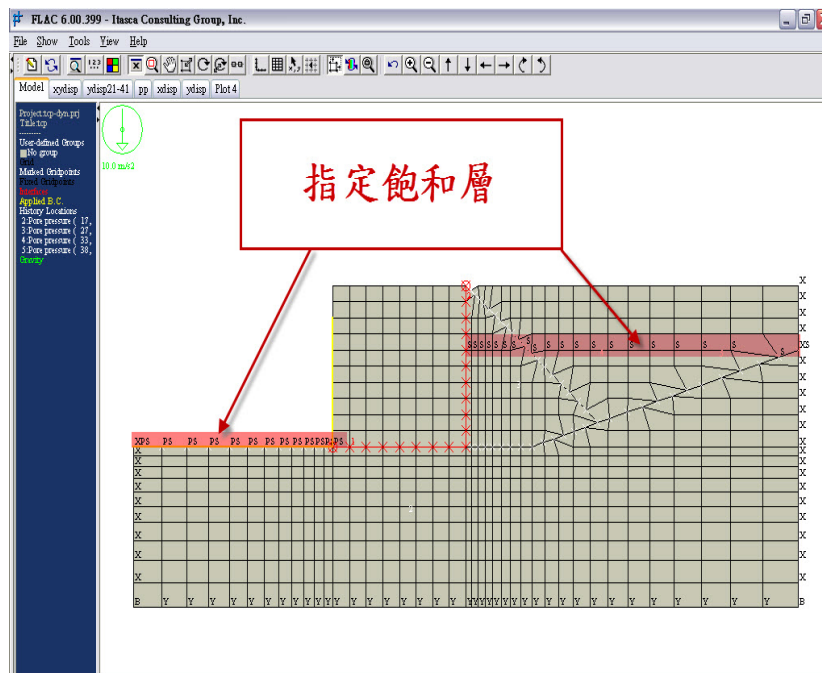


圖6.17 指定土體中及自由面上之飽和層示意圖

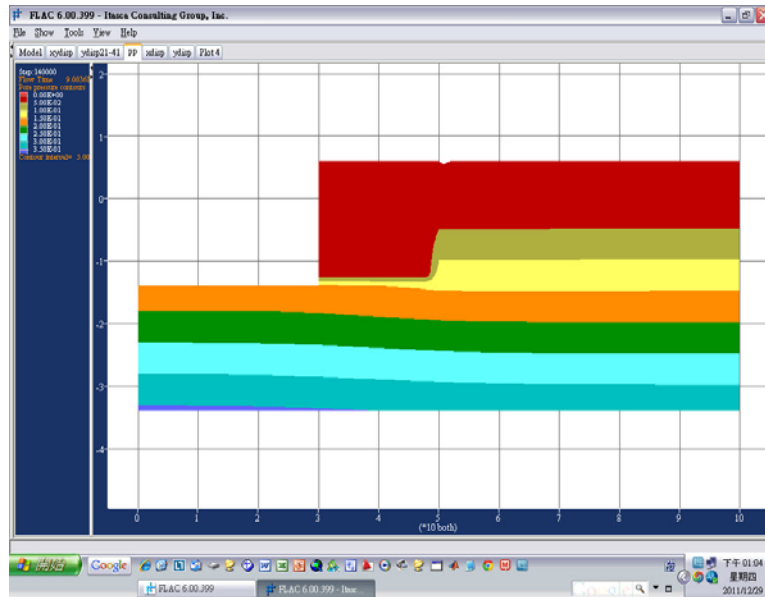


圖6.18 飽和面以下的土體達滲流平衡之示意圖

7. 靜態系統力學平衡

待滲流平衡後，關閉滲流模式，再開啓重力場並進行土體力學平衡之計算。此階段必須監測不平衡力，待不平衡力收斂，才表示土體達力學平衡，如圖 6.19 所示。

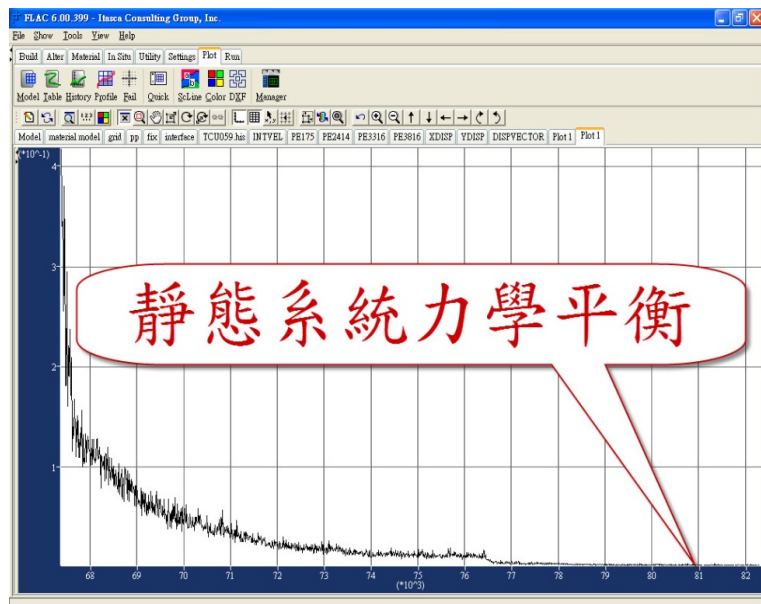


圖6.19 靜態系統力學平衡之示意圖

8. 指定Finn-Martin model於飽和砂土以模擬液化情形

為了模擬飽和砂土受地震致土壤液化之現象，採用 FLAC 程式內建之 Finn-Martin model，並以有效應力法分析之，如圖 6.20 所示。其中四個參數使用 FLAC 建議之參數值。表 6-6 則為 Finn-Martin model 模式所輸入之參數表。

表6-6 臺中港數值模擬之Finn模式參數表

部 位	剪力模數 (MPa)	體積模數 (MPa)	c (MPa)	 ()	C ₁ *	C ₂ *	C ₃ *	C ₄ *	Tension (Pa)
背填砂	30	50	0	30	0.8**	0.79**	0.45**	0.73**	1e10

*：Finn-Martin model中的四個參數

**：使用FLAC建議之參數值

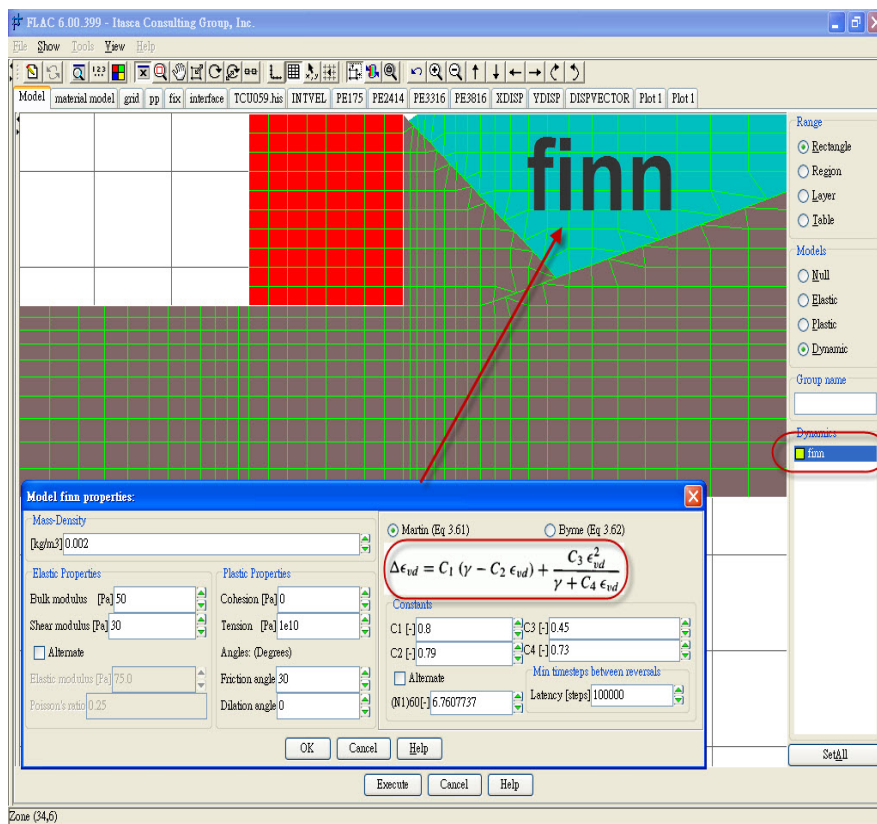


圖6.20 設定FLAC程式內建之Finn-Martin model參數

9. 於海側施加動態水壓力

考慮地震時沉箱結構受土壤側向土壓力及海側之水壓力，因此以 westergaard(1931)形式之動態水壓力施加於面海側之邊界。

10. 將加速度歷時資料積分為速度歷時資料

由於加速度歷時無法用於計算底部為吸能邊界之柔性基底，因此需將加速度歷時先積分為速度歷時，以利後續轉換為剪應力波，如圖 6.21 所示。

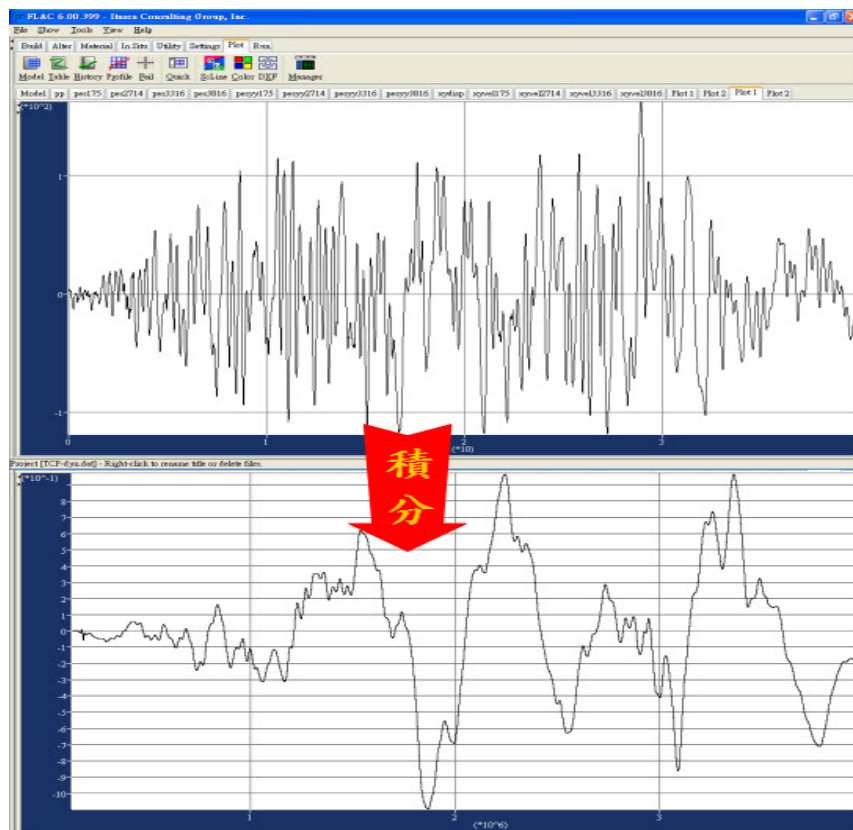


圖6.21 加速度歷時資料積分為速度歷時資料

11. 設定阻尼參數

於FLAC中使用 Rayleigh 阻尼並輸入阻尼參數(自然頻率及最小阻尼比)，如圖 6.22 所示。

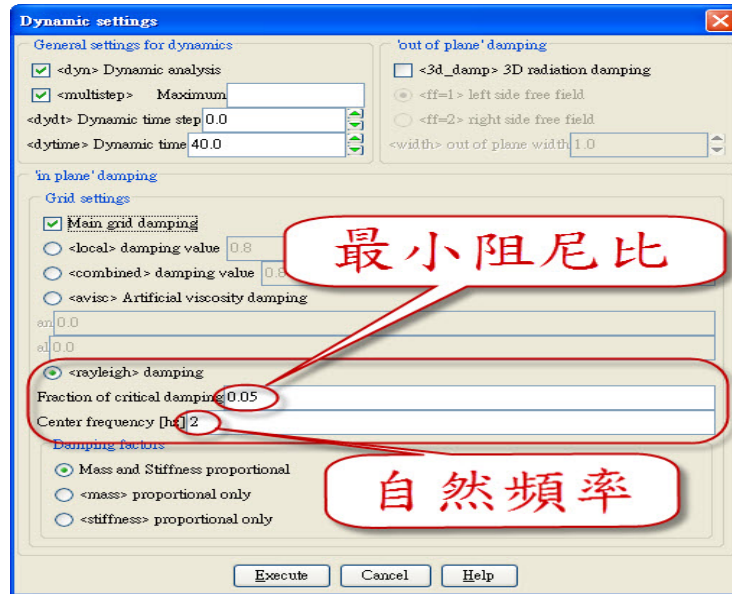


圖6.22 臺中港數值模擬之Rayleigh 阻尼參數設定

12. 指定自由場邊界及消能邊界條件

為模擬半無限空間波傳行為，分析時需於側向施加自由場邊界，底部則以可消除垂直與水平向震動之消能邊界模擬，如圖 6.23~圖 6.25 所示。

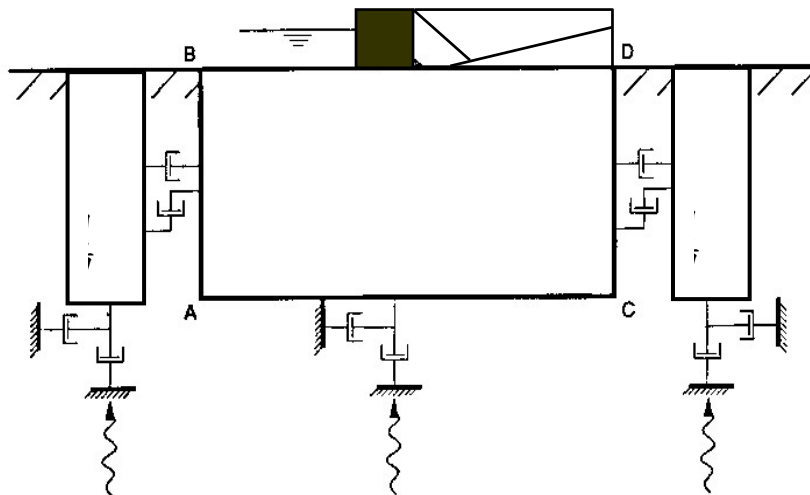


圖6.23 自由場邊界之地震分析模型

資料來源：FLAC5.0

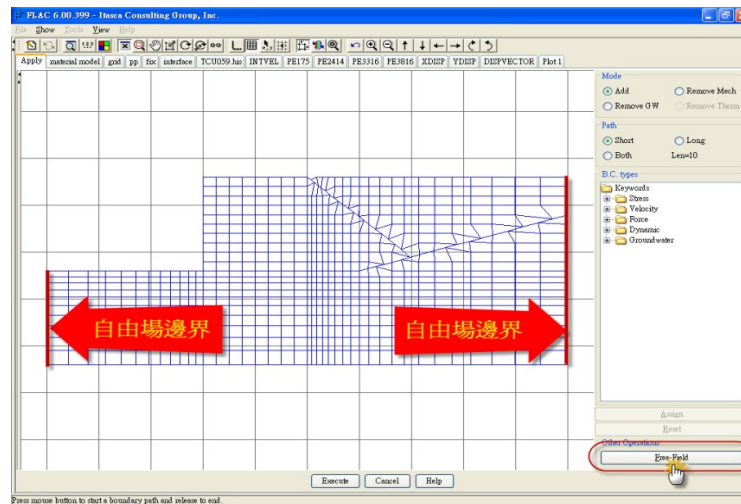


圖6.24 指定自由場邊界位置圖

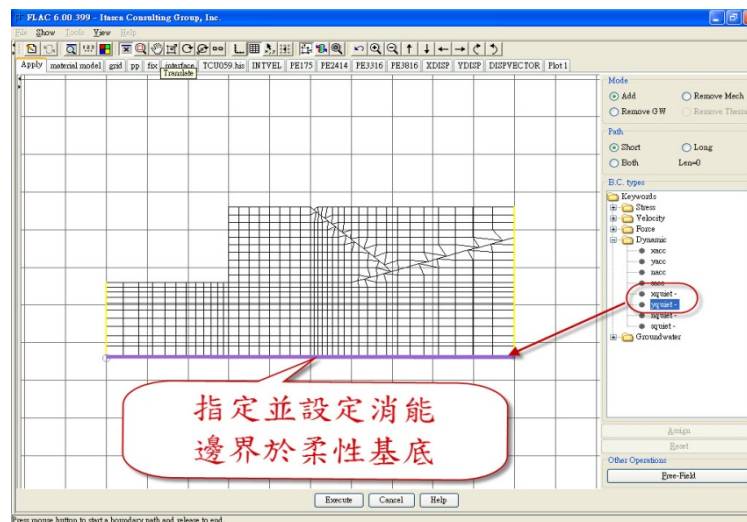


圖6.25 指定並設定消能邊界於柔性基底

13. 將速度波轉換成剪應力波並施加於柔性基底

為配合柔性基底之消能邊界，將加速度歷時積分成為速度歷時，再以公式轉換為剪應力波並使其作用於網格底部之柔性基底。其轉換公式為：

$$\sigma_s = 2(\rho C_s)V_s$$

式中： σ_s ＝作用於柔性基底之剪應力， ρ ＝底部土體之質量密度， C_s ＝底部土體之剪力波速， V_s ＝垂直或水平於波傳方向之質點速度

14. 進行自由場動態分析

以地震最大震動方向的循環周期 40 秒並整合動態荷重與無限空間波傳邊界來進行自由場動態分析，如圖 6.26~圖 6.27 所示。

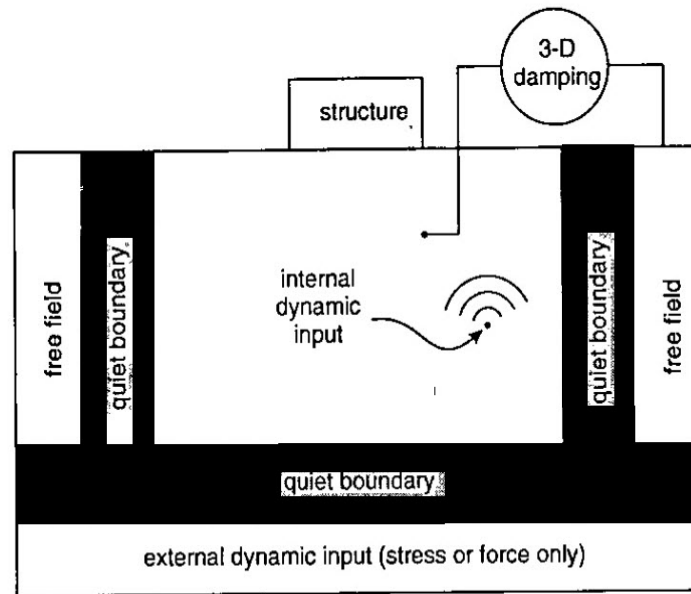


圖6.26 考慮動態荷重之自由場模型圖

資料來源：FLAC 5.0

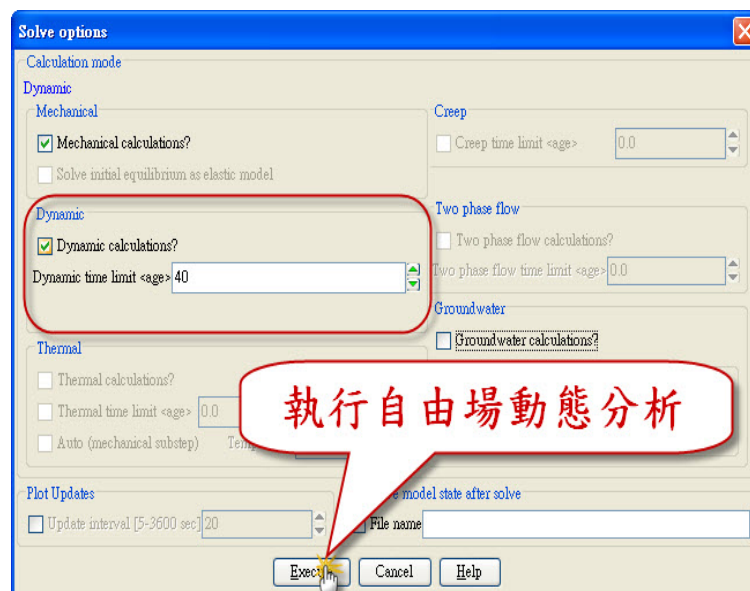


圖6.27 以循環周期40秒執行自由場動態分析

15. 分析流程

分析流程，如圖 6.28 所示。

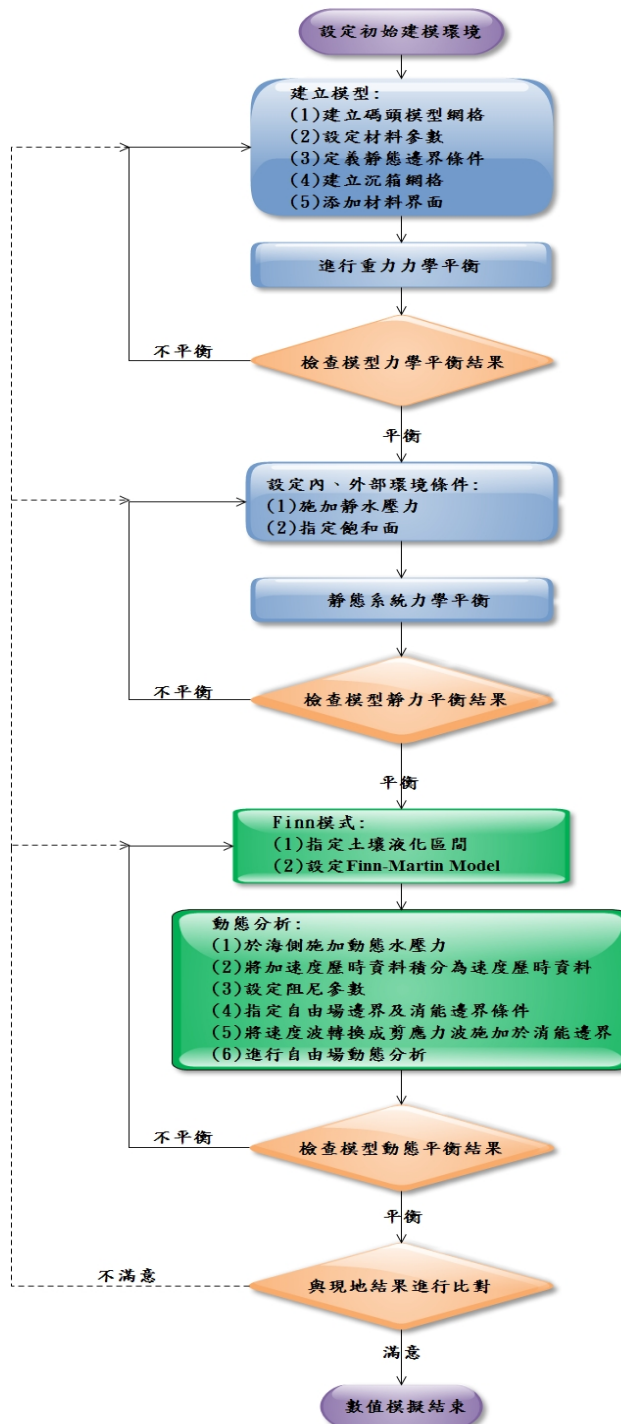


圖6.28 應用FLAC模擬碼頭受地震引致土壤液化之流程圖

16. 分析結果

(1) 沉箱位移量

數值模擬之沉箱往海側位移約0.75m、沉陷量約為0.86m，如圖6.29~圖6.30所示，此結果與現地量測碼頭產生0.5m~1.6m之海側位移量及碼頭產生約0.6m之沉陷量相近，顯示以FLAC應用程式來分析沉箱式碼頭之功能性為可行之方法。另外依水平位移量計算正規化水平位移 $d/H=4\%$ ，依表5.1之損害等級研判碼頭達第Ⅱ級之損害程度。

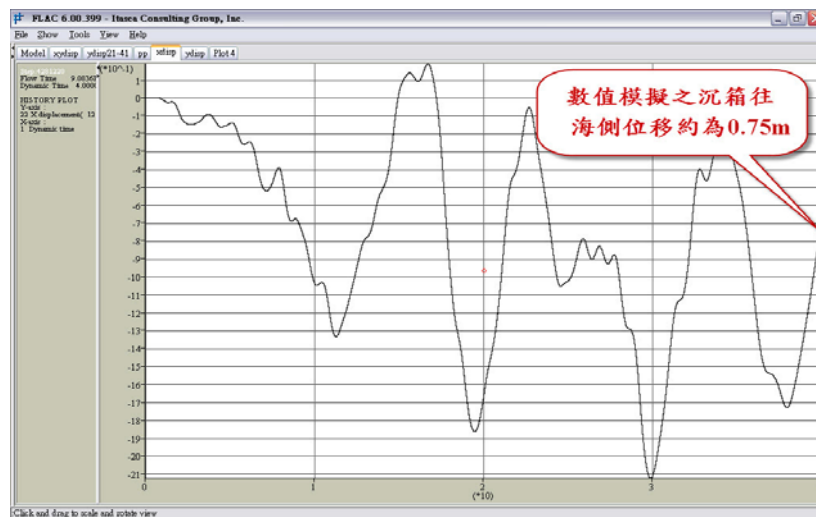


圖6.29 數值模擬之碼頭受震後往海側之位移量

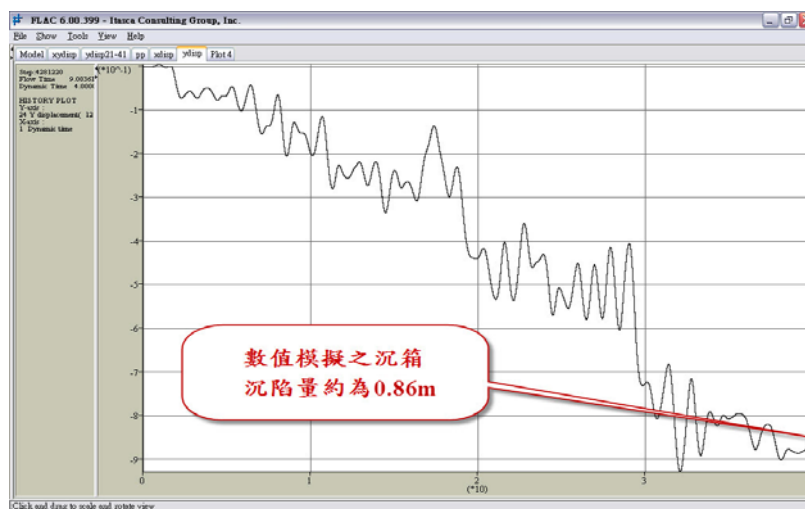


圖6.30 數值模擬之碼頭受震後往海側之沉陷量

(2)沉箱碼頭後線之地表變形

本案例於沉箱碼頭後線之地表處每2m設置一個監控點，分別監測該點地震作用下之沉陷位移量，如圖6.31~圖6.32所示。依圖6.32最終沉陷量顯示，後線最大沉陷量達1.5m以上。

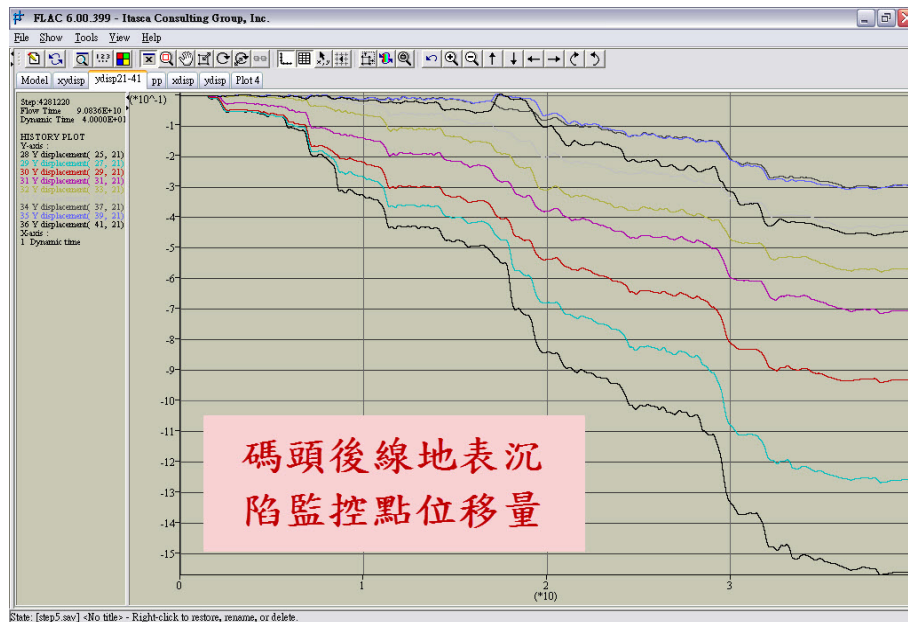


圖6.31 數值模擬之碼頭後線地表沉陷監控點位移量

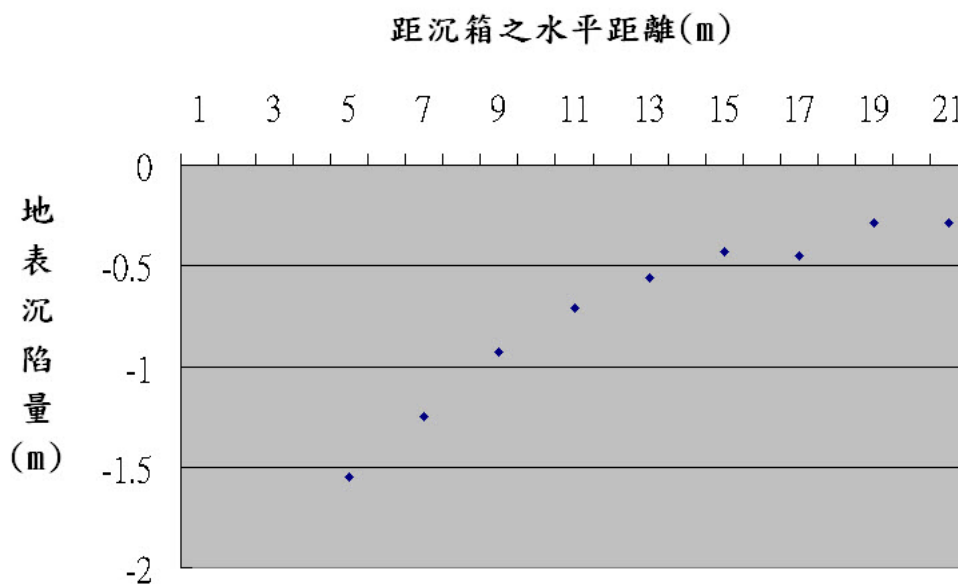


圖6.32 數值模擬之圖碼頭後線地表沉陷曲線圖

(3) 格網變形圖

數值模擬重力式沉箱碼頭受地震後之格網變形，如圖6.33所示。

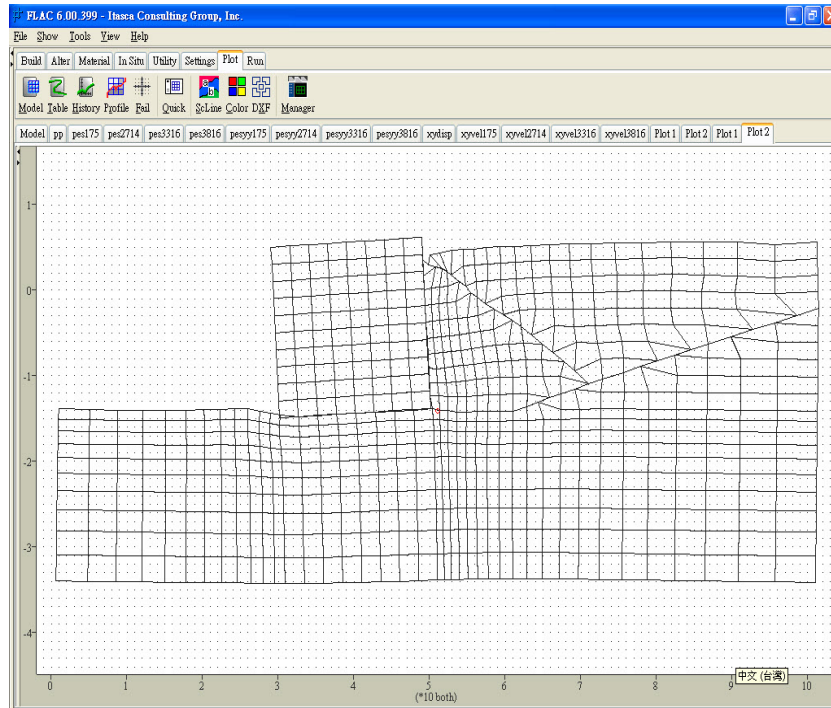


圖 6.33 重力式沉箱碼頭受地震後之格網變形

6.6 小結

由 6.3 節利用簡便分析法之檢核結果，臺中港 1~4 號重力式沉箱碼頭在不考慮土壤液化因素的前提下(原設計經本研究推測也未考慮土壤液化因素)，通過 B 級構造物在 3 個地震等級力的功能性檢核，顯示本研究第五章針對重力式碼頭功能性規定之探討，所建議未來基準在 B 級構造物的功能性標準及簡便方析方法是可行的。

由 6.4 節利用簡便動力分析法以 921 地震臺中港碼頭災損的案例驗證結果顯示，重力式碼頭若背填土壤可能發生土壤液化而評估時未考慮，可能會嚴重低估結構損壞程度，故未來重力式碼頭之功能性設計或評估應將土壤液化因素納入考量。

由 6.5 節利用動力分析法以 921 地震臺中港碼頭災損的案例驗證結果顯示，因 FLAC 可以有效模擬土壤發生液化對碼頭結構物穩定性的影響，故驗證結果尚能符合實際之碼頭災損情形，顯示以 FLAC 應用程式來分析沉箱式碼頭之功能性為可行之方法。

本研究因目前尚無能力製作各地震等級之模擬地震歷時記錄，故針對簡便動力分析及動力分析無法依不同的地震等級檢核碼頭之功能性是否符合應具備的功能目標，未來本所將與其他單位以合作的模式求得相關模擬地震歷時記錄，以完成簡便動力分析及動力分析的耐震功能性評估。

第七章 港灣地區地震監測分析

臺灣西海沿岸等港灣地區，其地層大都屬疏鬆軟弱的沖積土層或海埔新生地，土層在強烈地震反復作用及震波從震源深處向上經過軟弱覆土層的振幅放大後，極易產生土壤液化或沉陷，並造成碼頭結構物因基礎失去承載力而造成傾斜、位移及倒塌等破壞，因此設置地震之動態水壓監測站對港灣構造物之安全極為重要。

本所港研中心自民國 89 年起陸續於安平港、布袋港、臺中港、臺北港、高雄港及蘇澳港等逐年分別設置完成一組 300 m 深之井下地震及動態孔隙水壓監測站(如表 7-1)，各站井下地震儀陣列於地表、14m、30m、99m 及 297m 共設置 5 部地震儀，監測資料並以自動記錄及傳輸方式至本所港研中心之地震伺服器儲存。

本章係以港區地震站歷年監測所得之地震紀錄進行震波特性和地層放大效應、動態孔隙水壓變化、港區之場址效應及地層下陷等之相關性分析，併將分析資料彙整建置成資料庫，以提供碼頭結構物設計及港區地震工程研究之參考與應用。

7.1 地震及動態水壓監測系統

由於地震在鬆軟地層之放大效應，悠關港灣構造物之安全甚巨，為了瞭解地震時，地層中震波之傳遞特性，鑽數口井至各個地層，分別於最深之堅硬地盤及不同深度之軟弱土層，分層安置埋入型地震計分層監測，以瞭解港區地層之地震放大效應。本研究分層設計深度規劃大致為 GL-0m、GL-15m、GL-30m、GL-100m、GL-300m，唯實際埋設深度乃依現地土層變化狀況而調整。

另在強烈地震之反復作用下，土壤之孔隙水壓之逐漸上升，是土壤發生液化之主要因素，因此地震時動態水壓之監測，對港灣構造物

之安全極為重要。動態水壓即時監測系統，以監測地震時淺層動態水壓之即時變化，本研究分層設計深度規劃為 GL-3m、GL-6m、GL-10m、GL -15m、GL -30m，唯實際埋設深度依現地土層變化狀況而調整。

表 7-1 各港區設置井下地震儀資料表

測 站	設置位置	經緯度(度)	儀器深度	設置日期
安平港	8 號碼頭空地	經度 22.980 緯度 120.177	201m	89 年
臺中港	26 號碼頭空地	經度 24.273 緯度 120.520	283m	90 年
布袋港	砂石碼頭空地	緯度 23.375 緯度 120.133	300m	90 年
臺北港	大樓前花圃	經度 25.151 緯度 121.393	297m	91 年
高雄港	船舶管理中心花圃	緯度 22.598 緯度 120.283	292m	92 年
蘇澳港	棧埠所對面	經度 24.5909 緯度 121.863	35m	93 年
臺中火力電廠	圍牆外側綠地	緯度 24.206 緯度 120.486	200m	94 年

本章以臺北港及高雄港地震監測結果作為分析釋例，臺北港井下地震儀監測站於民國 91 年底完成，井下地震儀陣列設置於地表、-14m、-30m、-99m 及-297m 共設置 5 部地震儀，如圖 7.1 所示。監測期間雖未有強震之觀測資料，但是小規模地震非常頻繁，2007 至 2010 年擷取之地震觀測資料，篩選規模 4.5 以上較完整之地震資料共 24 組，如表 7-2，其中以 2008 年 6 月 2 日地震規模 5.8 之地表加速度 21gal 為最大，各深度之最大加速度如表 7-3 所示。

高雄港井下地震儀監測站於民國 92 年底完成，監測站之地層構造及地震計、水壓計埋設深度示意圖，如圖 7.2 所示。井下地震儀陣列於地表、15m、30m、100m 及 293m 共設置 5 部井下地震儀，2007 年至 2010 年間擷取之地震觀測資料，就規模 4.3 以上較完整之資料共 43 組如表 7-4 所示。

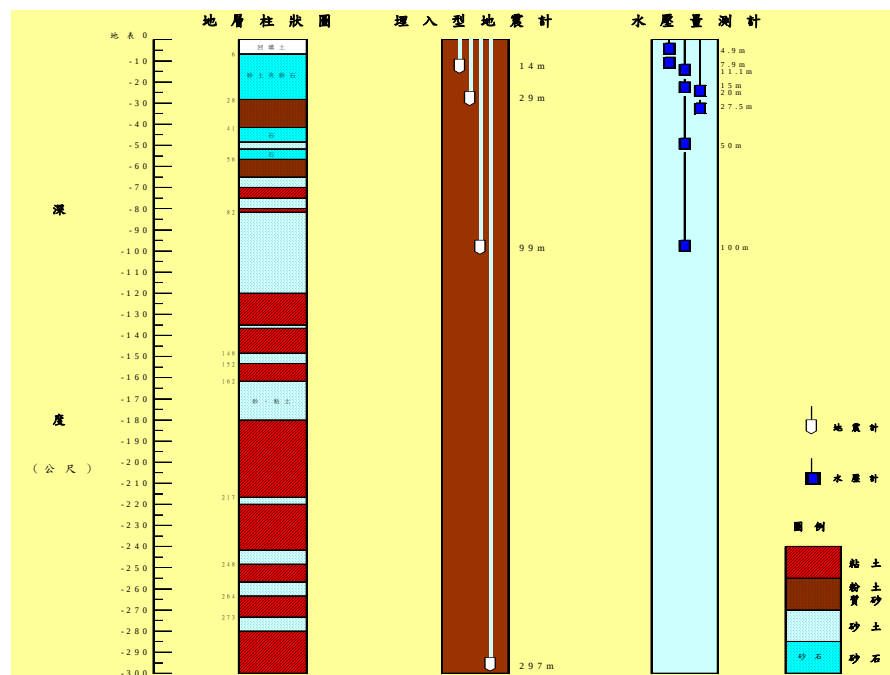


圖 7.1 臺北港井下地震及動態水壓監測站示意圖

表 7-2 臺北港 2007~2010 年井下地震觀測資料

No	監測時間(臺北時間)	震央位置		深度 km	規模
		北緯(度)	東經(度)		
1	2007-10-11; 11:05 19.00	24° 78'	121° 81'	78.9	5.5
2	2007-10-17; 22:40 51.00	24° 47'	121° 71'	42.2	5.7
3	2007-11-08; 06:54 45.00	24° 91'	122° 17'	4.0	5.0
4	2007-11-12; 18:25 12.00	24° 46'	121° 84'	18.4	4.5
5	2007-11-15; 09:51 09.00	24° 08'	121° 51'	18.0	4.8
6	2007-11-29; 05:05 41.00	24° 82'	121° 01'	65.0	5.5
7	2008-06-02; 00:59:40.00	24.86°	121.79°	92.3	5.8
8	2008-09-09; 15:43:53.00	24.61°	122.63°	103.8	5.9
9	2008-09-10; 19:56:03.00	25.13°	122.25°	16.8	4.6
10	2008-12-02; 11:17:31.00	23.28°	121. 60°	29.8	6.0
11	2008-12-08; 05:19:03.00	23.84°	122.17°	12.5	6.0
12	2009-01-04; 06:05:14.00	24.15	121.73	7.5	5.1
13	2009-04-17; 20:37:49.40	23.92	121.68	43.4	5.3
14	2009-05-15; 22:31:45.00	24.18	121.77	11.8	4.6
15	2009-07-14; 02:06:14.00	24.02	122.22	18.1	6.0
16	2009-07-26; 14:11:56.00	23.68	120.99	13.3	5.4
17	2009-08-17; 08:06:56.00	23.37	123.88	43.3	6.8
18	2009-10-04; 01:36:42.00	23.70	121.60	15.3	6.3
19	2009-11-05; 17:33:34.00	23.79	120.72	24.1	6.2
20	2009-12-19; 21:02:49.00	23.79	121.66	43.8	6.9
21	2010-03-04; 08:20:10.00	22.97	120.71	22.6	6.4
22	2010-04-26; 11:01:43.00	22.15	123.74	73.4	6.8
23	2010-06-27; 02:06:16.00	24.65	121.56	68	5.1
24	2010-07-09; 03:44:16.00	24.35	122.04	19.3	5.3

表 7-3 臺北港 2008 年地震站各深度最大加速度表

台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2008年6~9月份-共2筆)

編號：1/1 規模：5.8 深度：92.3 km			編號：1/1 規模：5.9 深度：103.8 km		
地震時間：08/06/02;00:59'23.7"			地震時間：08/09/09;15:43'13.3"		
記錄時間：08/06/02;00:59'40"			記錄時間：08/09/09;15:43'53"		
震央位置：北緯(度)：24.86 東經(度)：121.79			震央位置：北緯(度)：24.61 東經(度)：122.63		
頻道(方向)	儀器深度	(gal)	頻道(方向)	儀器深度	(gal)
1(南北)	地表	21.13	1(南北)	地表	4.13
2(東西)	地表	12.83	2(東西)	地表	3.24
3(垂直)	地表	6.91	3(垂直)	地表	2.23
4(南北)	14m	14.27	4(南北)	14m	1.88
5(東西)	14m	6.93	5(東西)	14m	2.11
6(垂直)	14m	4.58	6(垂直)	14m	1.65
7(南北)	30m	6.23	7(南北)	30m	1.08
8(東西)	30m	9.18	8(東西)	30m	2.01
9(垂直)	30m	-	9(垂直)	30m	-
10(南北)	99m	7.32	10(南北)	99m	0.86
11(東西)	99m	2.11	11(東西)	99m	0.56
12(垂直)	99m	1.86	12(垂直)	99m	0.31
13(南北)	297m	1.58	13(南北)	297m	-
14(東西)	297m	1.67	14(東西)	297m	0.52
15(垂直)	297m	1.84	15(垂直)	297m	-

台北港地震監測站各頻道最大加速度值(2008年12月份-共2筆)

編號：1/2 規模：6.0 深度：29.8 km			編號：2/2 規模：6.0 深度：12.5km		
地震時間：08/12/02;11:16'53.3"			地震時間：08/12/08;05:18'36.7"		
記錄時間：08/12/02;11:17'31"			記錄時間：08/12/08;05:19'03"		
震央位置：北緯：23.28° 東經：121.6°			震央位置：北緯：23.84° 東經：122.17°		
頻道(方向)	儀器深度	(gal)	頻道(方向)	儀器深度	(gal)
1(南北)	地表	2.98	1(南北)	地表	3.25
2(東西)	地表	2.33	2(東西)	地表	2.00
3(垂直)	地表	1.42	3(垂直)	地表	1.23
4(南北)	14m	1.50	4(南北)	14m	1.58
5(東西)	14m	1.66	5(東西)	14m	1.57
6(垂直)	14m	1.29	6(垂直)	14m	0.91
7(南北)	30m	2.31	7(南北)	30m	0.73
8(東西)	30m	-	8(東西)	30m	-
9(垂直)	30m	0.11	9(垂直)	30m	0.00
10(南北)	99m	0.48	10(南北)	99m	0.47
11(東西)	99m	0.67	11(東西)	99m	0.61
12(垂直)	99m	0.26	12(垂直)	99m	0.28
13(南北)	297m	0.38	13(南北)	297m	-
14(東西)	297m	-	14(東西)	297m	-
15(垂直)	297m	-	15(垂直)	297m	-

7.2 井下地震監測分析

為瞭解地震波於臺北港區之放大特性，茲以臺北港 2008 年間監測振幅較大資料為例，如圖 7.3 至圖 7.4 所示，分別為 2008 年 6 月 2 日地震歷時圖之東西向(EW)、南北向(SN)各深度之尖峰加速度，由 297m 上傳至地表時，其振幅有明顯放大。

高雄港區之放大特性，以振幅較大之 2006 年 12 月 26 日恆春地震歷時為示意圖，如圖 7.5 所示。

為探討及臺北、臺中及高雄港震波放大特性，本節將臺北港 2003 年 17 組地震之各深度之最大加速度正規化，即將各深度之最大加速度除以地表之最大加速度。並加以統計迴歸分析，正規化之最大加速度隨深度變化之迴歸分析結果，如圖 7-6 所示。高雄港自 2003 至 2008 年採較完整之 28 組地震資料進行各深度之最大加速度正規化，如圖 7.7 及圖 7.8 所示，各港分析結果迴歸函數如下列所示：

臺北港最大加速度之正規化值隨深度變化之迴歸分析結果，分別如下：

$$\text{南北向：正規化加速度} = \exp(-0.16 * (\text{深度})^{0.38}) \dots\dots\dots (7-1a)$$

$$\text{東西向：正規化加速度} = \exp(-0.21 * (\text{深度})^{0.32}) \dots\dots\dots (7-1b)$$

$$\text{垂直向：正規化加速度} = \exp(-0.22 * (\text{深度})^{0.28}) \dots\dots\dots (7-1c)$$

臺中港最大加速度之正規化值隨深度變化之迴歸分析結果，分別如下：

$$\text{南北向：正規化加速度} = \exp(-0.20 * (\text{深度})^{0.30}) \dots\dots\dots (7-2a)$$

$$\text{東西向：正規化加速度} = \exp(-0.24 * (\text{深度})^{0.25}) \dots\dots\dots (7-2b)$$

$$\text{垂直向：正規化加速度} = \exp(-0.10 * (\text{深度})^{0.45}) \dots\dots\dots (7-2c)$$

高雄港最大加速度之正規化值隨深度變化之迴歸分析結果，分別如下：

南北向：正規化加速度 $=\exp(-0.146*(深度)^{0.404})$(7-3a)

東西向：正規化加速度 $=\exp(-0.147*(深度)^{0.401})$ (7-3b)

垂直向：正規化加速度 $=\exp(-0.230*(深度)^{0.276})$(7-3c)

由地震波放大倍率與最大加速度之研究可發現，臺北港震波放大倍率約於 3-5 倍之間，平均約為 4 倍，如圖 7.9。臺中港震波放大倍率約於 2-5 倍之間，平均約為 3 倍。高雄港震波放大倍率約於 3-7 倍之間，平均約為 4.5 倍，如圖 7.10；由此可見高雄港區淺層地層最為疏鬆軟弱，且與深層地層之軟硬比最大，臺北港次之，臺中港最小。

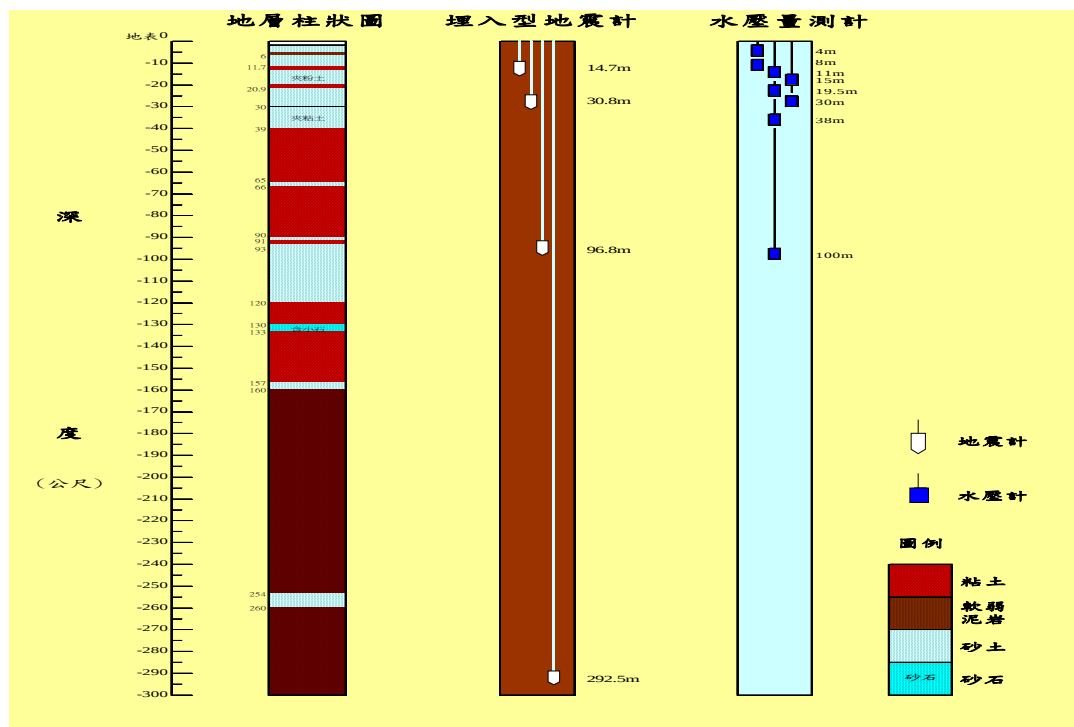


圖 7.2 高雄港井下地震及動態水壓監測站示意圖

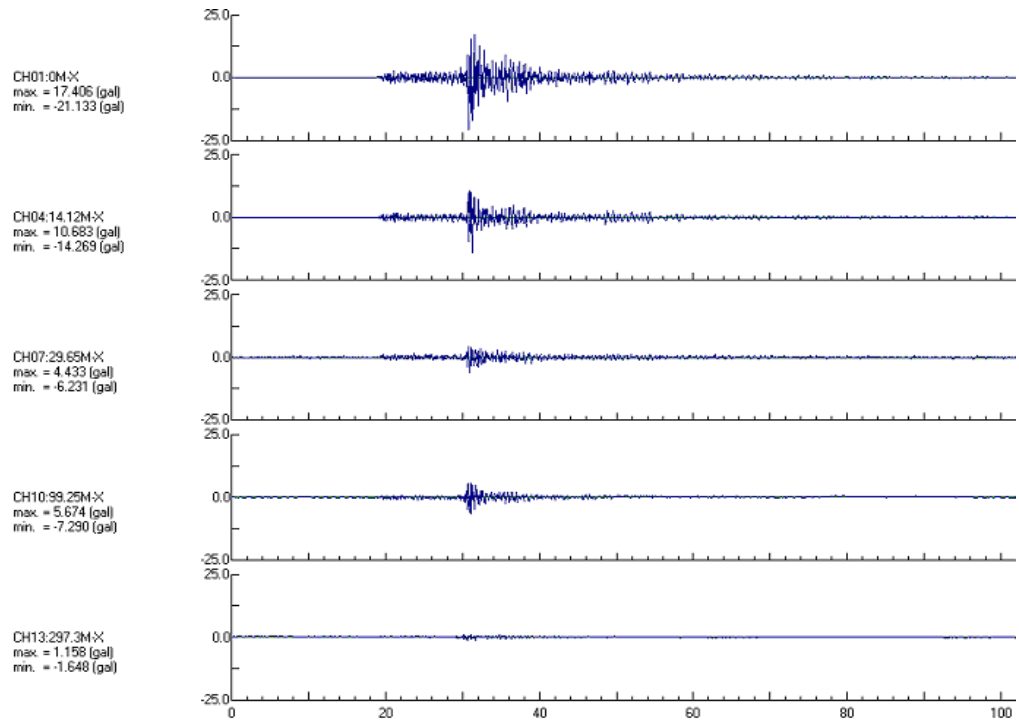


圖 7.3 臺北港 2008 年 6 月 2 日 00 時 59 分地震(南北向)

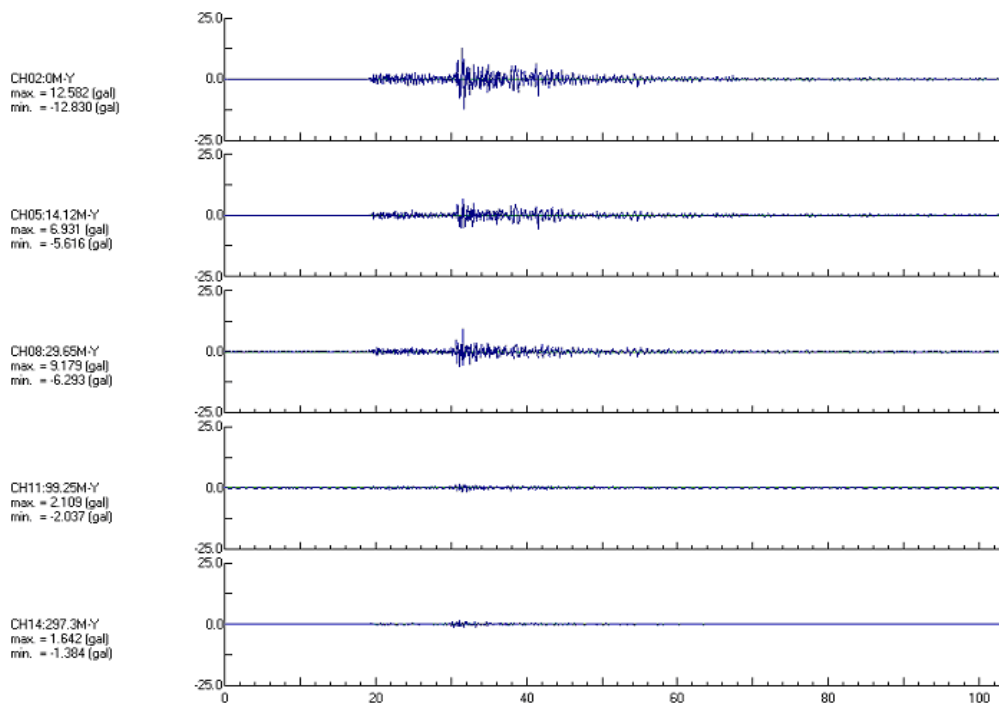


圖 7.4 臺北港 2008 年 6 月 2 日 00 時 59 分地震(東西向)

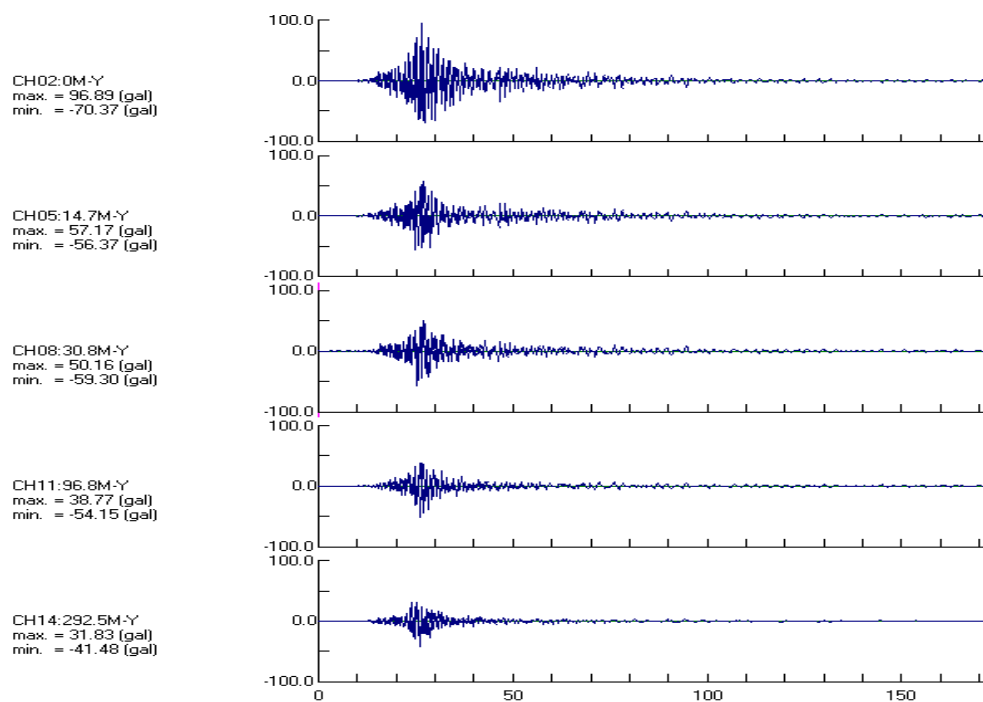


圖 7.5 高雄港 2006 年 12 月 26 日 20 點 34 分地震波

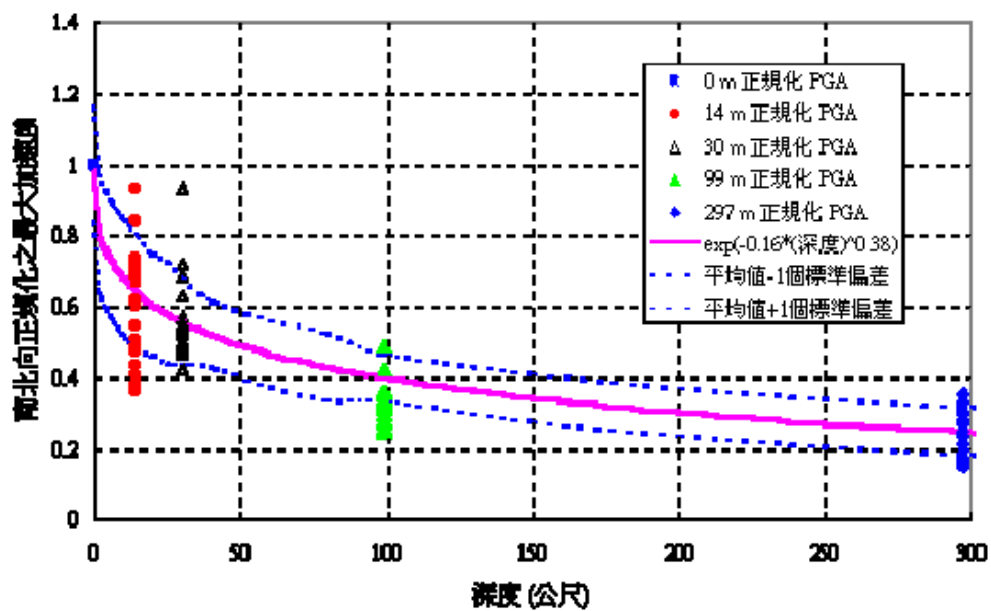


圖 7.6a 臺北港井下地震儀南北向最大加速度正規化後隨深度變化圖

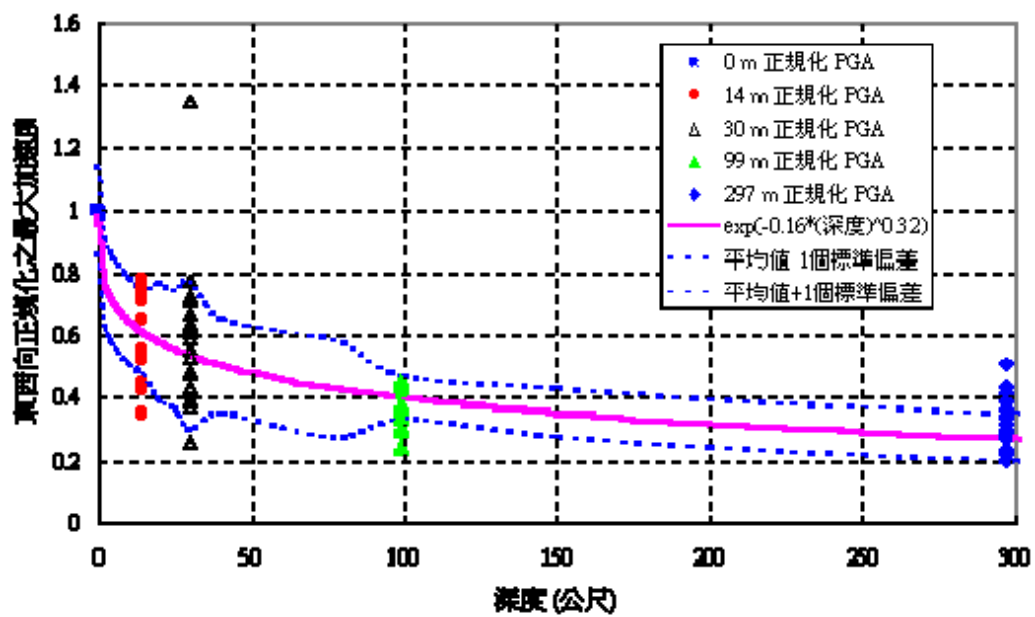


圖 7.6b 臺北港井下地震儀東西向最大加速度正規化後隨深度變化圖

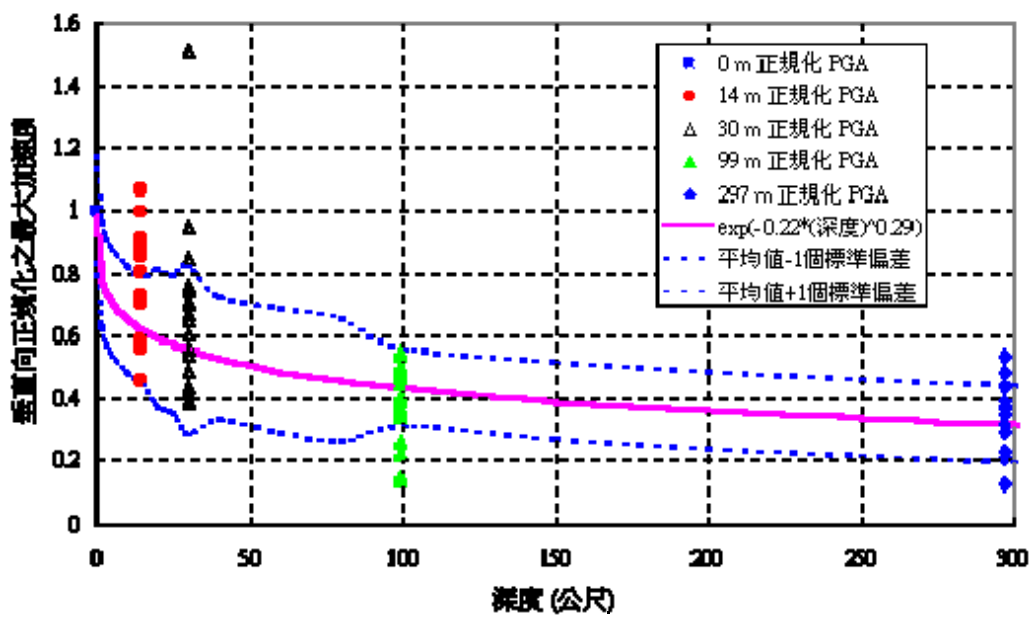


圖 7.6c 臺北港井下地震儀垂直向最大加速度正規化後隨深度變化圖

表 7-4a 高雄港 2007~2008 年井下地震資料之規模、震央與震源深度

	監測時間(臺北時間)	位置		深度 km	規模
		緯度	經度		
1	2007-01-25; 18:59:47.00	22.63	122.03	25.8	6.2
2	2007-02-19; 05:05:33.00	21.79	120.40	44.3	5.1
3	2007-06-24; 22:39:04.00	22.79	120.46	25.4	3.8
4	2007-07-03; 15:18:40.00	22.4	120.15	29.2	3.9
5	2007-08-09; 08:56:19.00	22.65	121.08	5.5	5.7
6	2007-10-17; 22:40:00.00	23.5	121.61	42.1	5.4
7	2007-10-19; 22:25:39.00	22.96	120.63	18.7	4.3
8	2007-10-22; 03:57:56.00	22.96	120.63	17.8	4.1
9	2007-12-05; 09:42:08.00	23.07	121.19	11.3	5.1
10	2008-02-18; 04:33:36.00	23.31	121.46	28.3	5.4
11	2008-03-05; 01:32:09.00	23.21	120.70	11.3	5.2
12	2008-03-05; 06:43:03.00	23.21	120.71	12.0	4.6
13	2008-04-14; 23:40:22.00	22.83	121.33	27.2	5.1
14	2008-04-24; 02:29:19.00	22.87	121.68	11.1	5.6
15	2008-04-24; 06:05:01.00	22.83	121.69	13.3	5.2
16	2008-04-25; 22:34:03.00	22.32	120.23	27.0	3.8
17	2008-05-01; 03:22:56.00	21.82	120.38	38.4	4.6
18	2008-05-14; 02:28:20.00	22.77	121.04	7.0	5.0
19	2008-06-15; 07:29:41.00	22.90	120.59	16.9	4.8
20	2008-07-03; 08:06:06.00	23.19	120.67	15.1	4.3
21	2008-10-31; 06:25:46.00	23.07	120.23	16.0	4.0
22	2008-10-31; 16:38:37.00	23.07	120.22	15.4	4.6
23	2008-12-02; 11:17:36.00	23.28	121.60	29.8	6.0
24	2008-12-08; 05:19:42.00	23.80	122.20	35.1	5.9
25	2008-12-23; 08:04:55.00	22.95	120.57	17.1	5.3

表 7-4b 高雄港 2009~2010 年井下地震資料之規模、震央與震源深度

	監測時間(臺北時間)	位置		深度 km	規模
		緯度	經度		
1	2009-01-02; 09:40:28.00	21.65	119.91	65.1	5.1
2	2009-06-22; 18:48:59.00	23.42	120.42	8.6	4.5
3	2009-08-17; 08:06:47.00	23.37	123.88	43.3	6.8
4	2009-10-04; 01:36:40.00	23.65	121.58	29.2	6.1
5	2009-10-11; 14:42:36.00	21.93	120.63	42.0	5.0
6	2009-10-18; 20:16:15.00	23.02	120.58	20.2	4.0
7	2009-11-05; 17:33:33.00	23.79	120.72	24.1	6.2
8	2009-11-05; 19:35:03.00	23.77	120.76	24.0	5.7
9	2010-01-09; 07:40:40.00	22.61	120.58	34.2	4.4
10	2010-01-10; 11:25:06.00	22.48	121.33	84.9	4.8
11	2010-01-19; 14:10:25.00	23.8	121.67	37.3	5.6
12	2010-02-07; 14:11:33.00	23.33	123.77	88.0	6.6
13	2010-03-04; 08:19:06.00	22.97	120.71	22.6	6.4
14	2010-03-04; 16:16:29.00	22.96	120.93	19.0	5.7
15	2010-07-25; 11:52:34.00	22.84	120.69	19.6	5.7
16	2010-09-24; 11:52:34.01	22.52	120.4	35.6	4.1
17	2010-11-12; 23:39:23.00	23.21	120.41	17.5	5.2
18	2010-11-21; 20:32:46.00	23.85	121.69	46.9	6.1

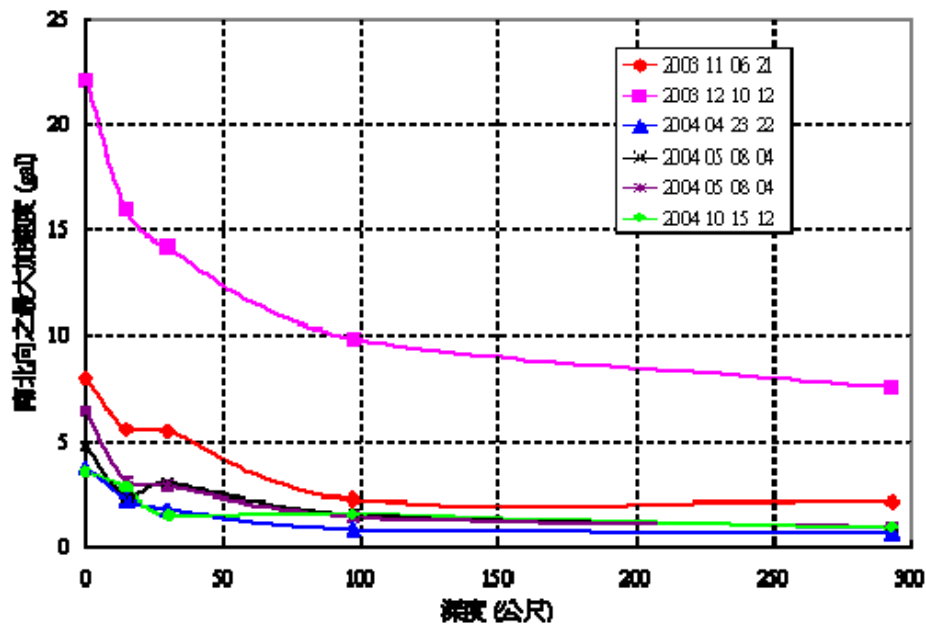


圖 7.7 高雄港井下地震儀南北向之最大加速度隨深度變化圖

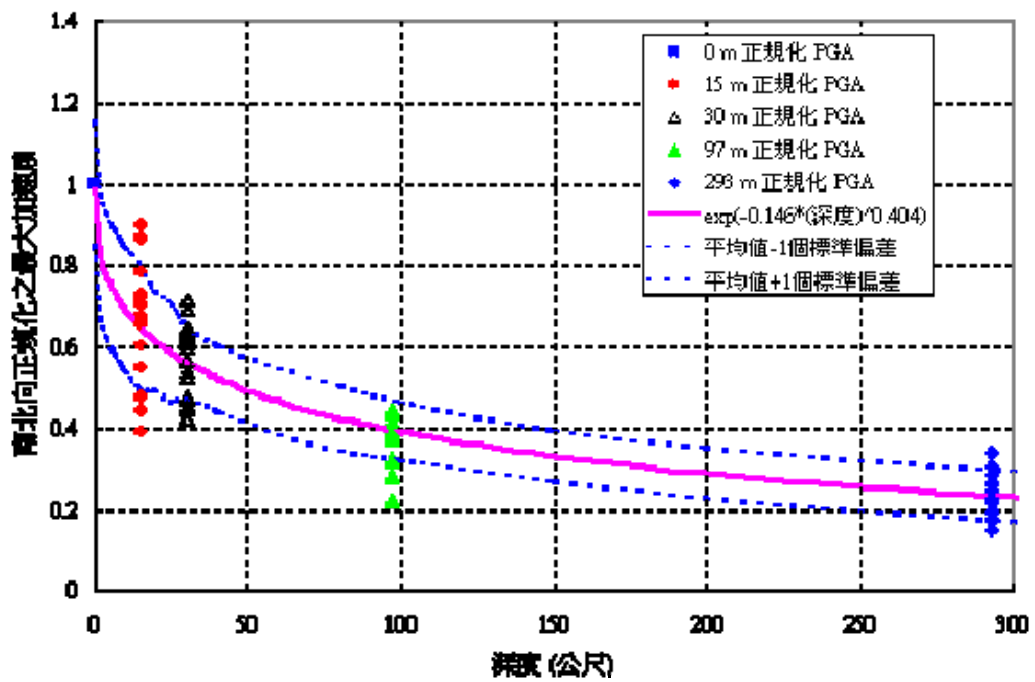


圖 7.8 高雄港井下地震儀南北向最大加速度正規化後隨深度變化圖

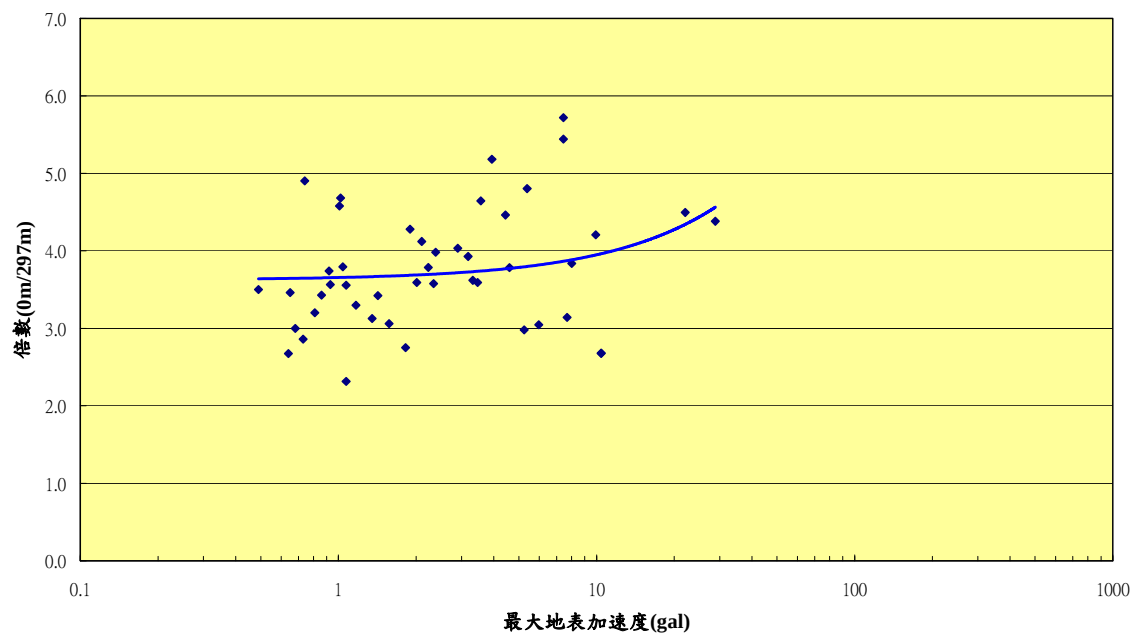


圖 7.9 臺北港井下地震站震波放大倍率與地表最大加速度圖

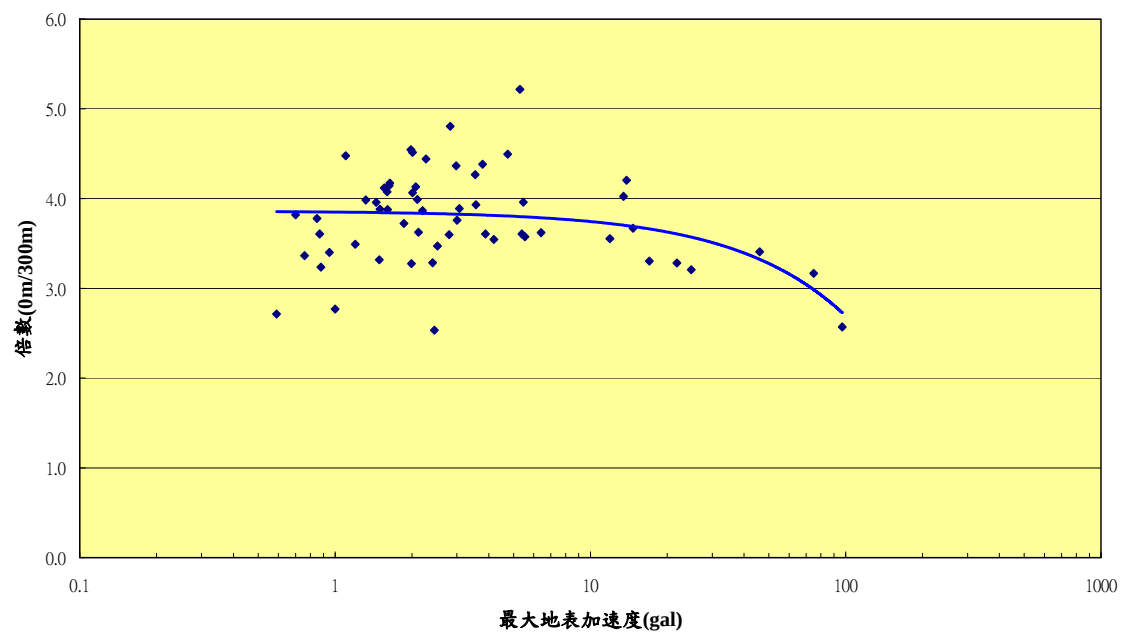


圖 7.10 高雄港井下地震站震波放大倍率與地表最大加速度圖

7.3 動態水壓監測分析

各港區井下地震及動態孔隙水壓監測站，自民國 90 年陸續設置完成開始監測以來，蘇澳港及安平港曾擷取到動態孔隙水壓紀錄，茲就簡述如下，蘇澳港測站於 93 年底完成，井下地震儀陣列設置於地表、-8m、-15m、-22m 及-35m 共 5 部地震儀，2007 年至 2009 年間擷取之地震觀測資料，就規模 4.2 以上較完整之資料共 40 組，如表 7-5、表 7-6。監測期間之地震活動非常頻繁，其中以 2005 年 3 月 6 日地震規模 5.9 之地表加速度 151gal 最大，具有動態孔隙水壓資料為 2005 年 3 月 6 日及 2007 年 9 月 7 日之地震，如圖 7.11 所示。安平港測站於 2010 年 3 月 4 日之甲仙地震亦監測到動態孔隙水壓資料，如圖 7.12 所示。

表 7-5 蘇澳港 2007 年井下地震監測資料表

No	監測時間(臺北時間)	震央位置		深度 km	規模
		緯度(度)	經度(度)		
1	2007-01-25; 18:59:16.60	22.86	121.86	5.0	6.2
2	2007-02-12; 13:40:25.30	24.40	121.81	13.1	4.4
3	2007-02-18; 23:46:08.30	24.42	122.05	14.9	4.4
4	2007-04-28; 18:39:48.40	24.83	121.97	12.7	4.4
5	2007-06-17; 12:26:22.30	24.39	121.88	23.7	4.2
6	2007-06-20; 22:21:43.50	24.40	121.80	13.3	4.3
7	2007-07-13; 04:54:13.20	24.73	121.79	7.0	4.4
8	2007-07-22; 06:55:23.20	24.38	121.83	14.4	4.2
9	2007-07-23; 21:40:02.10	23.69	121.70	31.0	5.9
10	2007-09-07; 01:51:25.30	24.20	122.43	54.0	6.6
11	2007-09-07; 01:55:21.60	24.19	122.51	36.8	5.7
12	2007-09-22; 14:27:04.90	24.46	121.87	22.5	4.8
13	2007-10-11; 11:05:02.50	24.78	121.81	78.9	5.5
14	2007-10-19; 02:24:28.80	24.47	121.84	16.7	4.4
15	2007-11-08; 06:54:15.90	24.91	122.17	4.0	5.0
16	2007-11-12; 18:24:42.50	24.46	121.84	18.4	4.5
17	2007-11-29; 05:05:14.30	24.82	122.01	65.0	5.5
18	2007-12-15; 18:46:53.00	24.07	122.45	61.0	4.8

表 7-6 蘇澳港 2008~2009 年井下地震監測資料表

No	監測時間(臺北時間)	震央位置		深度 km	規模
		緯度(度)	經度(度)		
1	2008-02-18; 04:33:54.00	23.31	121.46	28.3	5.4
2	2008-02-28; 02:54:25.00	24.83	122.29	14.4	4.8
3	2008-03-01; 00:58:24.00	24.00	122.53	26.1	5.1
4	2008-06-02; 00:59:40.00	24.86	121.79	92.3	5.8
5	2008-06-15; 19:16:17.00	22.90	120.59	16.9	4.8
6	2008-07-11; 11:08:11.00	25.13	122.25	16.0	4.7
7	2008-07-12; 14:12:01.00	24.19	121.81	6.4	4.5
8	2008-08-02; 02:56:11.00	24.05	121.53	21.1	5.1
9	2008-08-18; 01:38:20.00	24.00	121.70	42.8	4.6
10	2008-09-07; 07:00:59.00	23.99	121.81	50.6	4.6
11	2008-09-09; 15:43:36.00	24.61	122.63	103.8	5.9
12	2008-12-02; 11:17:36.00	23.28	121.60	29.8	6.0
13	2008-12-08; 03:17:41.00	23.85	122.20	35.1	5.9
14	2008-12-30; 09:31:55.00	24.70	122.34	95.4	5.1
15	2009-01-04; 06:04:34.30	24.19	121.68	2.7	5.1
16	2009-01-24; 21:46:34.60	24.89	122.04	6.2	4.4
17	2009-01-24; 21:48:25.50	24.89	122.04	4.8	4.6
18	2009-03-14; 15:01:45.40	24.38	121.70	30.1	4.6
19	2009-04-17; 20:38:05.00	23.92	121.68	43.4	5.3
20	2009-11-05; 17:33:24.00	23.79	120.72	24.1	6.2
21	2009-12-19; 21:02:34.00	23.78	121.75	45.9	6.8

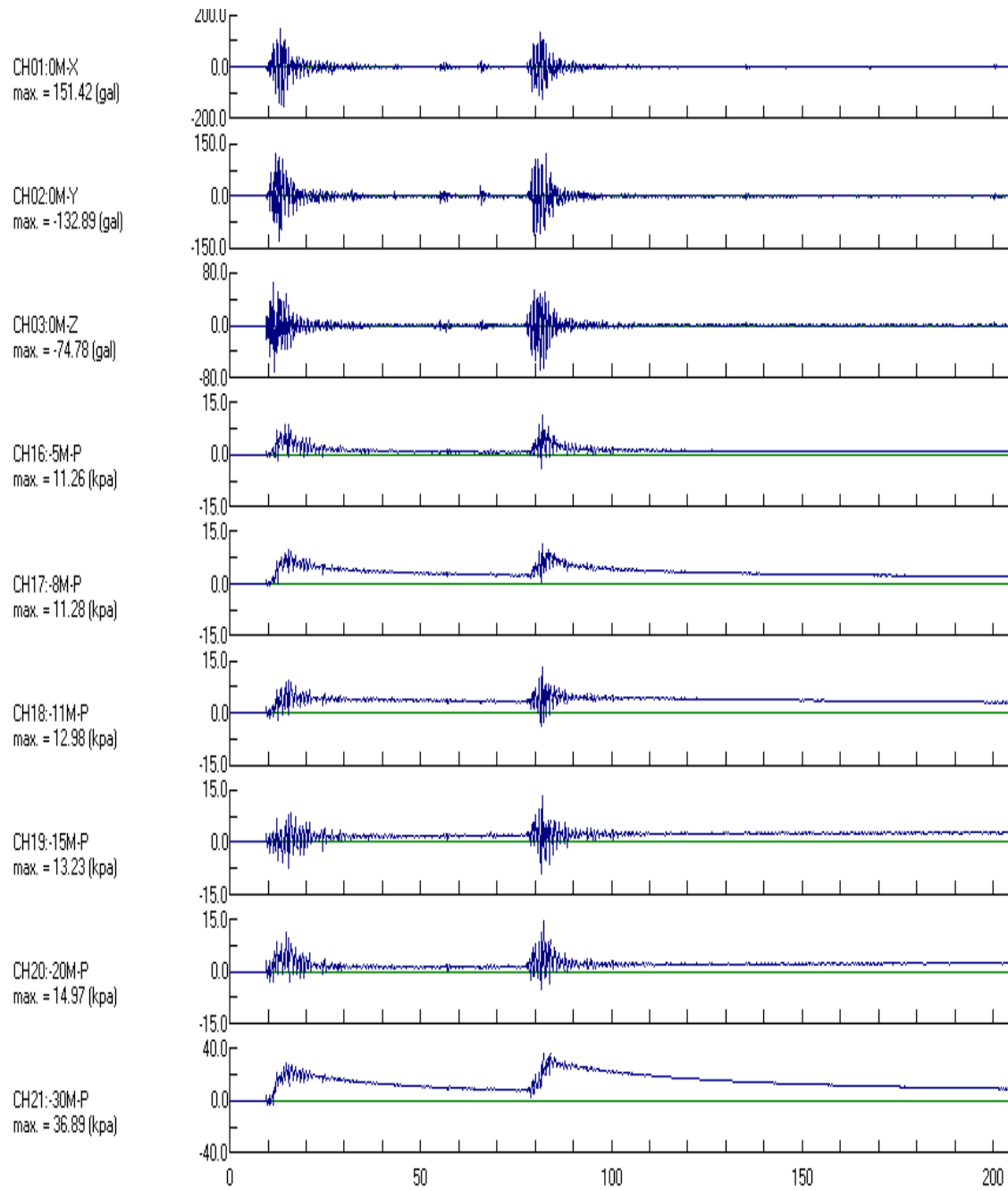


圖 7.11a 蘇澳港地震站 2005 年 3 月 6 日地震之動態孔隙水壓變化

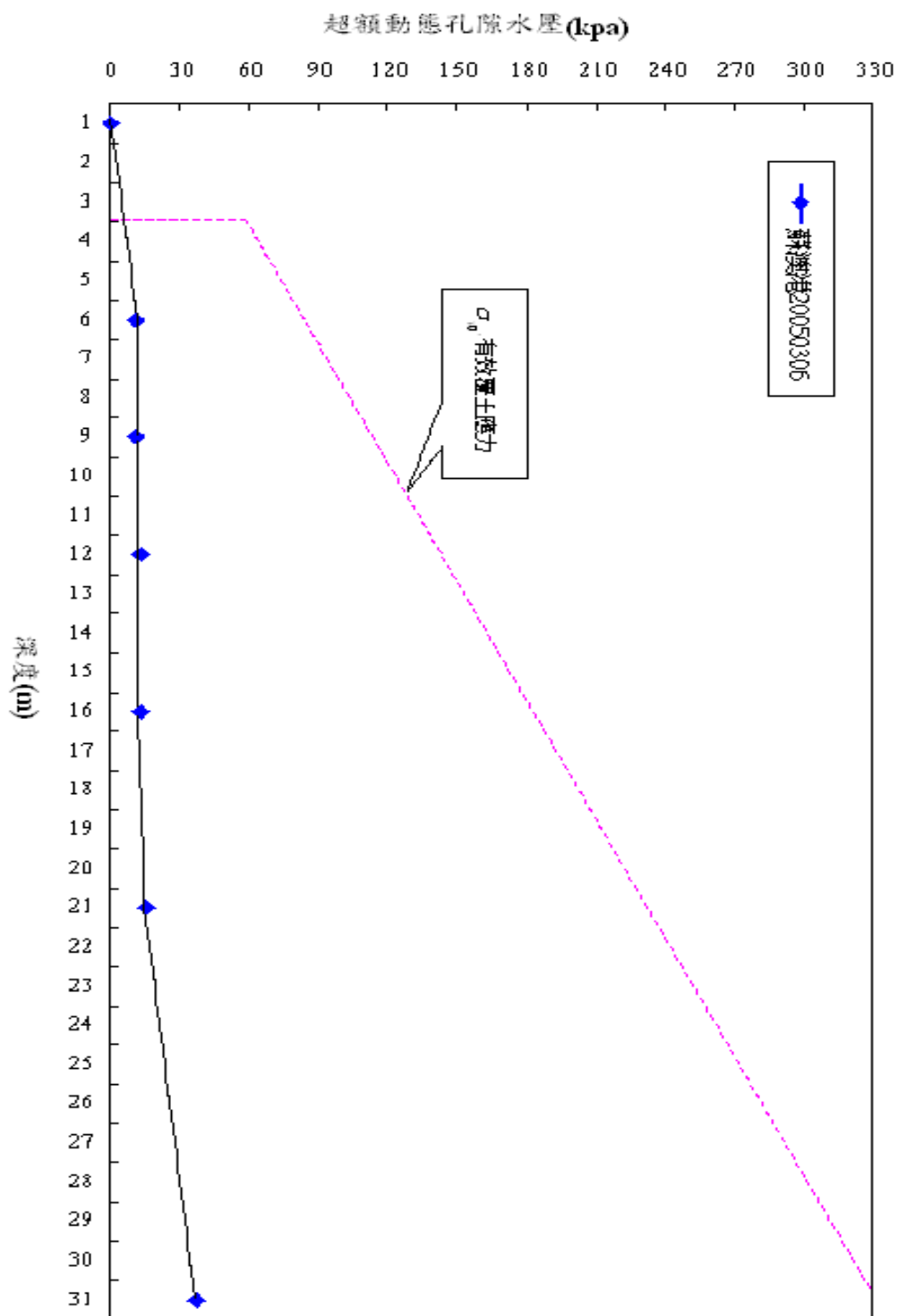


圖 7.11b 蘇澳港 2005 年地震作用下不同深度之超額孔隙水壓圖

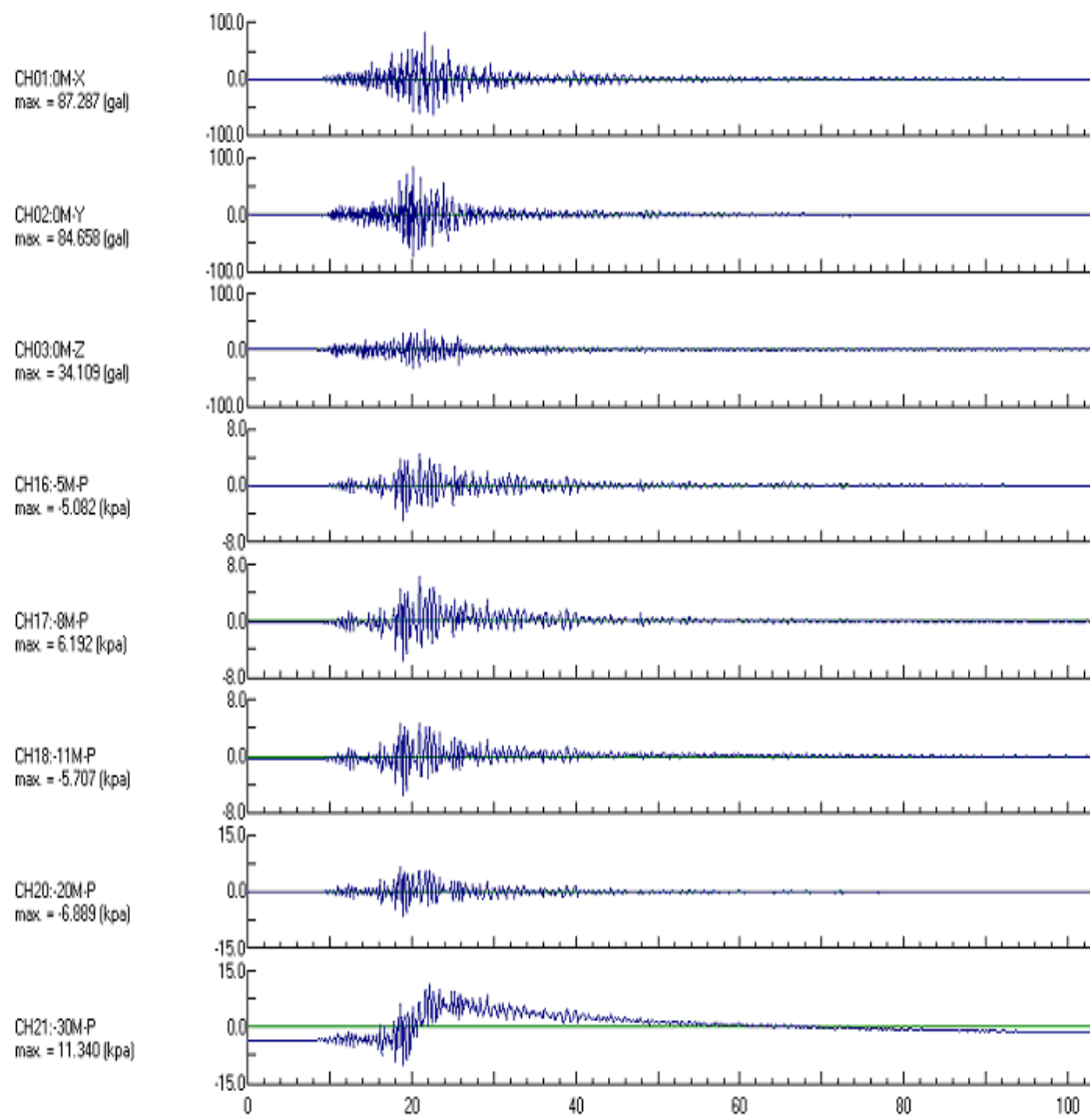


圖 7.11c 蘇澳港 2007 年 9 月 7 日地震之動態孔隙水壓變化

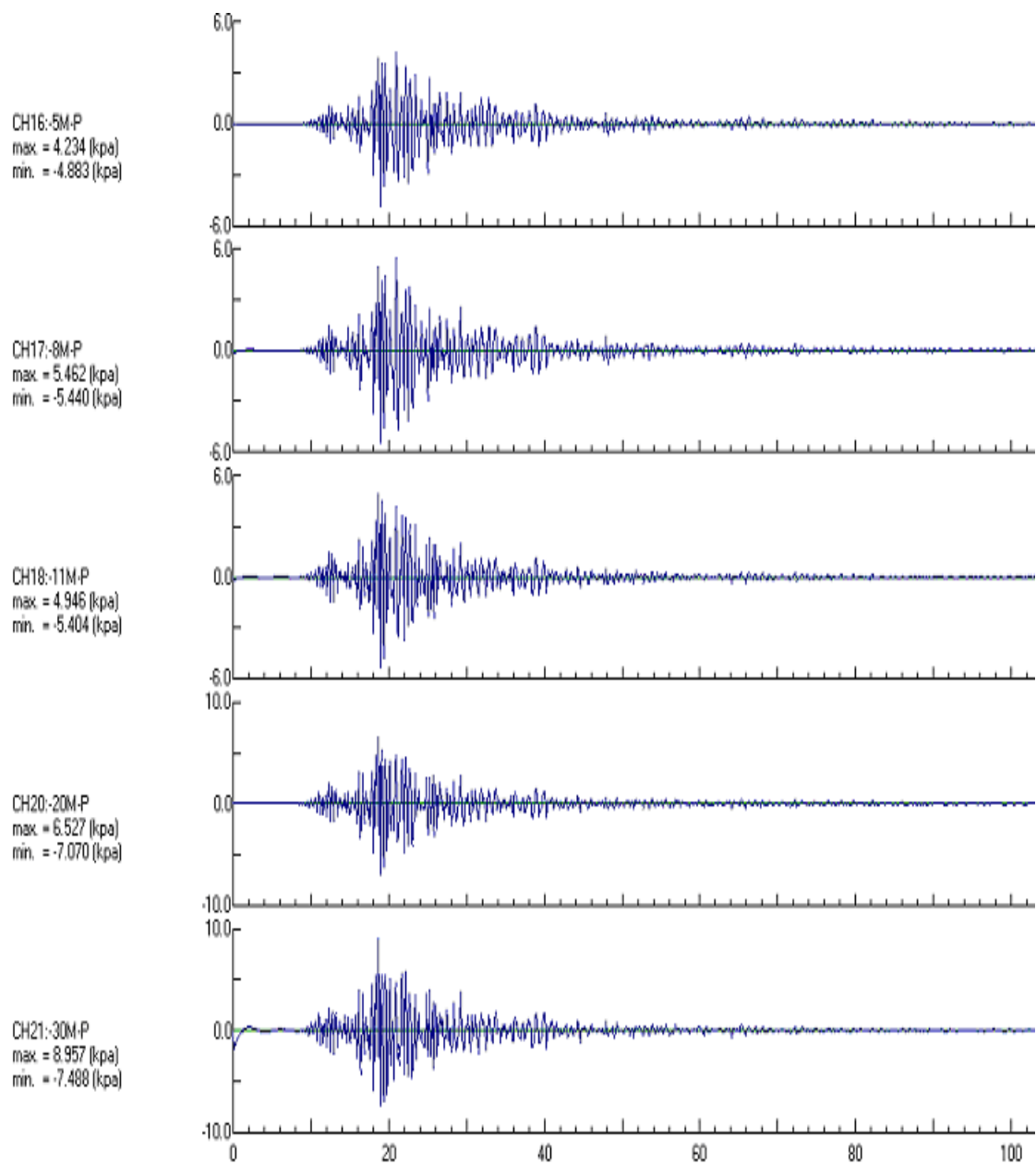


圖 7.11d 蘇澳港 2007 年 9 月 7 日地震之動態孔隙水壓變化
(大於 0.25Hz)

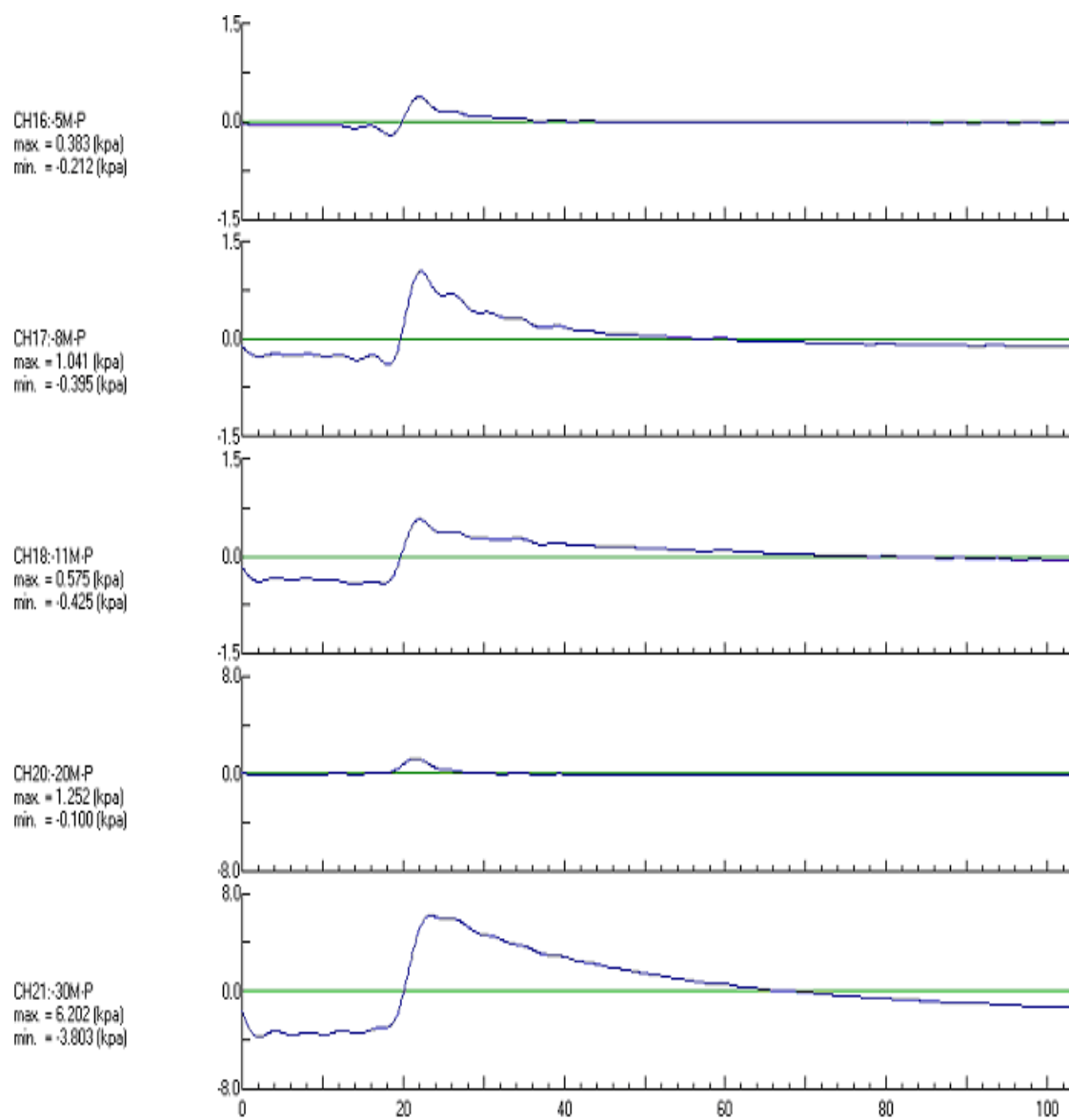


圖 7.11e 蘇澳港 2007 年 9 月 7 日地震之動態孔隙水壓變化
(小於 0.25Hz)

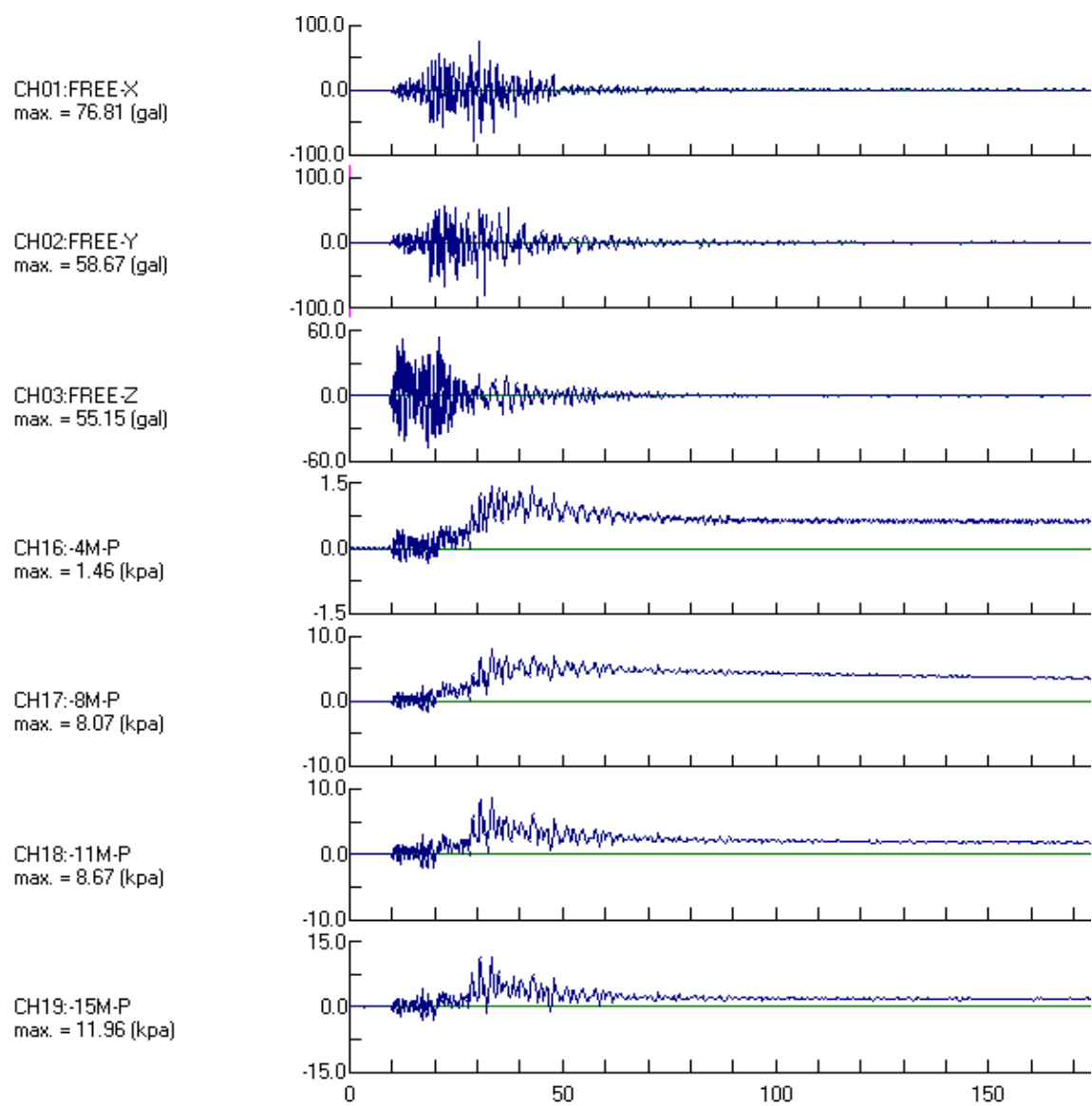


圖 7.12a 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化

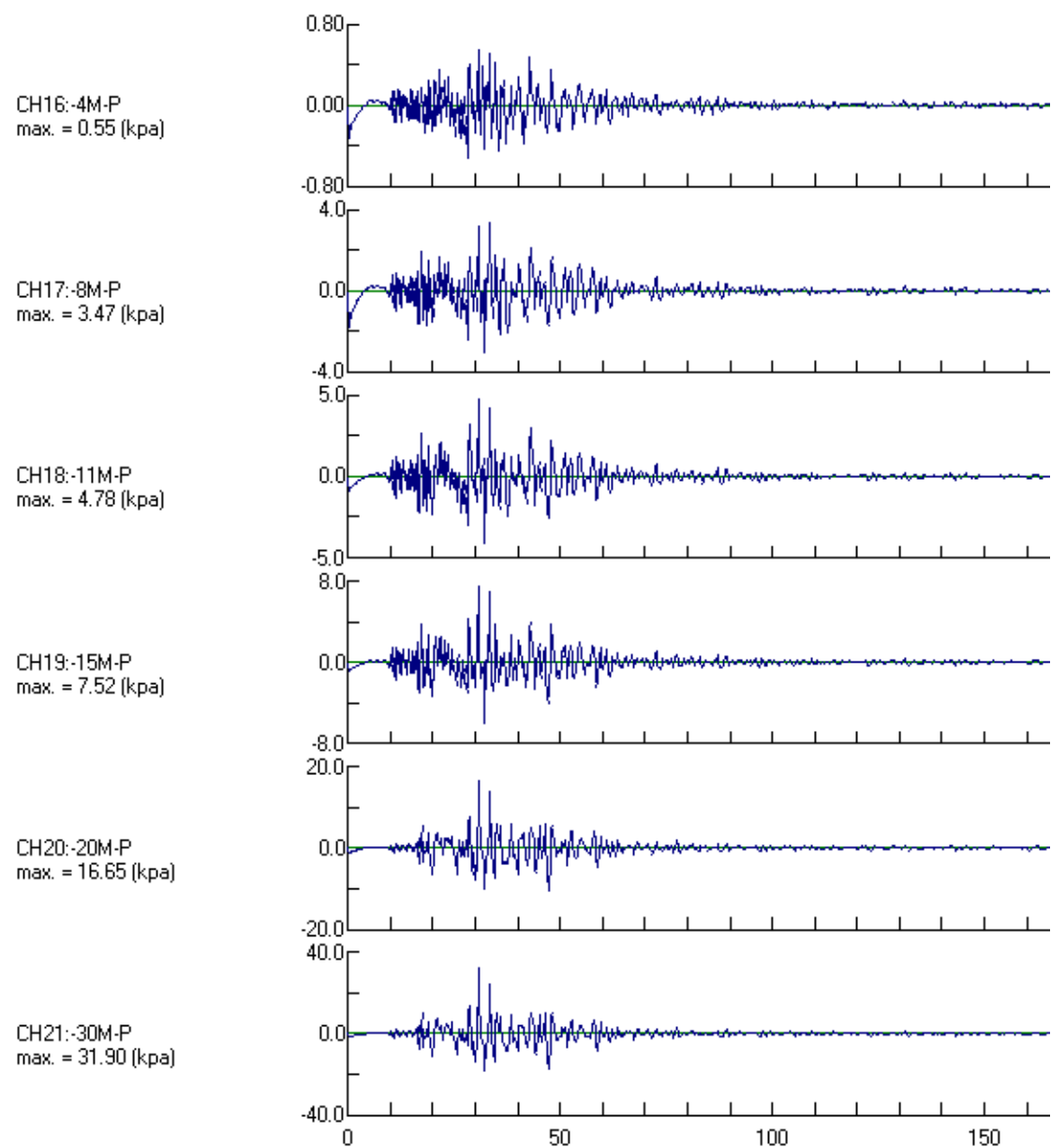


圖 7.12b 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化
(大於 0.08Hz)

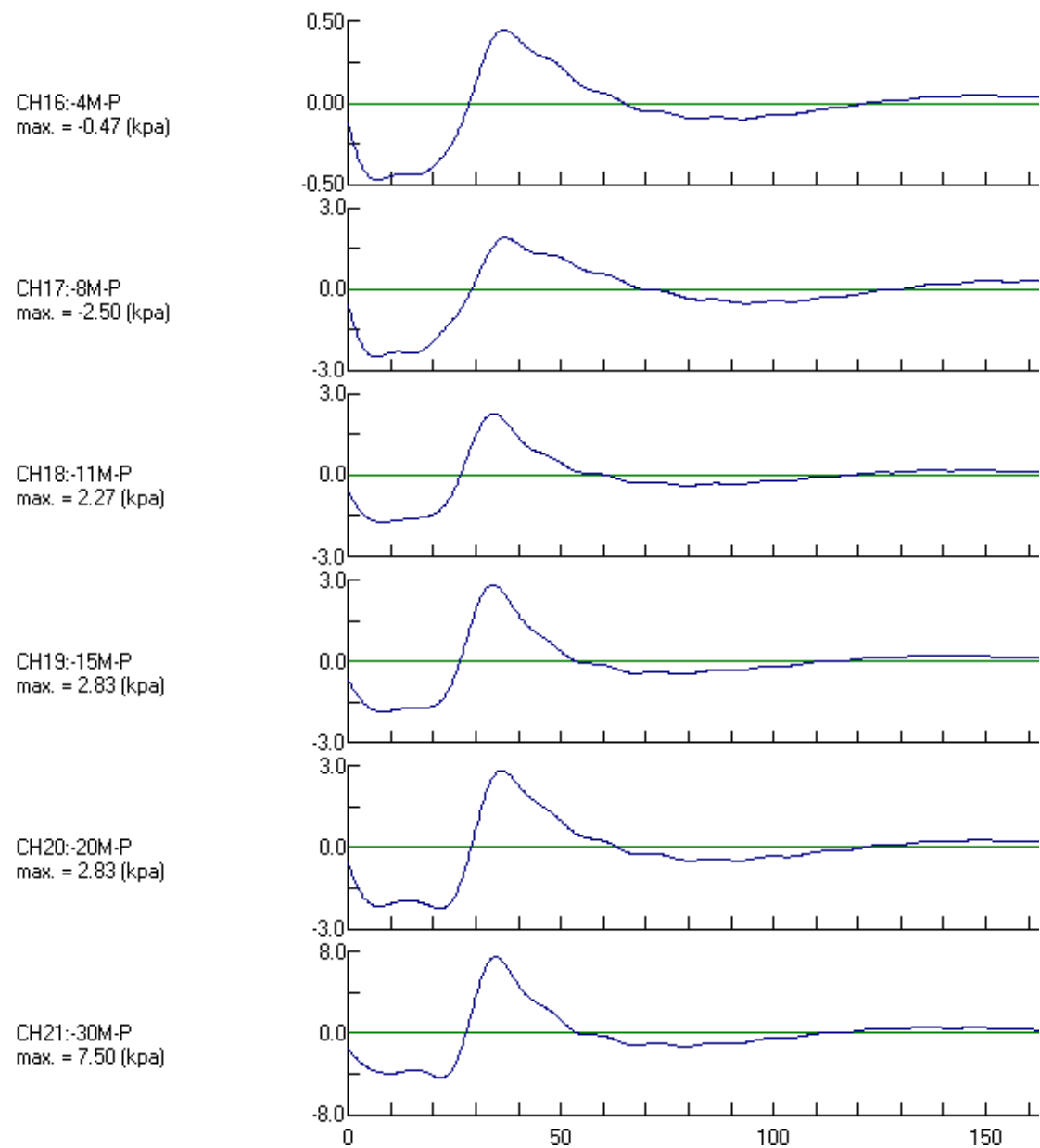


圖 7.12c 安平港 2010 年 3 月 4 日地震之動態孔隙水壓變化
(小於 0.08Hz)

7.4 地表地震監測分析

地表運動之場址效應一般採用地震頻譜來進行分析，而常用的分析方法，主要可以分為傅氏頻譜(Fourier Spectrum)與反應譜(Response Spectrum)兩種。傅氏頻譜是將觀測站所收錄的地震紀錄時間序列進行傅立葉轉換(Fourier transform)至頻率域，可計算出此地震紀錄之傅氏振幅譜。如有岩盤參考站時，可以再分為傳統的雙站頻譜比法(Borcheret)和單站頻譜比法(Nakamura)。而在工程應用方面，常使用反應譜法，反應譜是地震波作用在結構物上所反應的最大值，因為反應譜加上阻尼振盪，所以得到的頻譜圖形會較傅氏頻譜平滑。本節分別以傅氏頻譜法及反應譜法選擇以高雄港地震站為例，就地表地震儀監測所得之資料進行彙整分析。

7.4.1 傅立葉振幅譜

傅氏頻譜(Fourier spectrum)分析法即將各測站之地震紀錄，自時間域經由傅氏轉換至頻率域後，可計算出各測站之傅氏振幅譜。若 $f(t)$ 為時間域之地震紀錄，則其傅氏頻譜為

$$F(\omega) = \int f(t)e^{i\omega t} dt \dots\dots\dots (7-4)$$

$f(t)$ 之傅氏振幅譜即為 $F(\omega)$ 之絕對值，即

$$|F(\omega)| = \{ \text{Re}[F(\omega)]^2 + \text{Im}[F(\omega)]^2 \}^{1/2} \dots\dots\dots (7-5)$$

本文為了方便計算機處理，使用快速傅立葉轉換法(Fast Fourier transform, FFT)將所有的地震加速度資料經(7.4)式轉換，再以(7.5)式計算傅氏振幅譜。最後由頻譜比分析可瞭解不同頻率震波作用下，各測站在不同頻率之放大情形。

7.4.2 傅氏頻譜分析

各港區地震監測站所擷取到的每一筆地震資料，皆係來自不同方向、規模、距離、及震源深度所產生，為瞭解測站地震波之振盪主頻(predominant frequency)及其對港區碼頭結構物之影響，本節採取井下監測站所擷取之地表水平最大加速度地震資料進行傅氏頻譜轉換分析，藉以求得地表最大加速度(PGA)之主頻，各傅氏頻譜圖以中央氣象局公佈之震度分級來彙整。

臺北港井下地震站監測期間並無較大地震發生，自 2007 年至 2009 年止，僅選擇 3 級地震(25gal)以下較完整約 20 餘筆不同大小震度之地表歷時地震紀錄進行傅氏譜分析，經由傅氏轉換後，將水平兩個方向的頻譜值取均方根(RMS)計算，頻譜圖並以 1、2 及 3 級震度來區分，各級振盪主頻隨著震度不同而稍有差異，如圖 7.13~圖 7.16 所示。經初步分析結果，各級地震之平均主頻約介於 0.71Hz~0.86Hz。

選取臺北港井下地震站 2008 年 6 月 2 日所監測之地震資料，經傅氏頻譜轉換分析後，各不同深度之傅氏頻譜圖如圖 7.17 及 7.18 所示。由 RFAS 頻譜比圖中可觀察到深度-14m 處，在 4.5Hz 附近 RFAS 值出現明顯的放大反應。

高雄港地震站自 2007 年監測至 2009 年止，共紀錄約 30 餘筆不同大小震度之歷時資料，大部份是 3 級以下的輕弱級地震，選擇其中完整之地表歷時地震資料進行傅氏譜分析，各級震度頻譜圖(Fourier amplitude spectrum)如圖 7.19~圖 7.22 所示。初步分析結果，各級地震之平均主頻約介於 0.88Hz~1.02Hz。

台北港2007~2008年弱震傅氏振幅譜圖(測站1級)

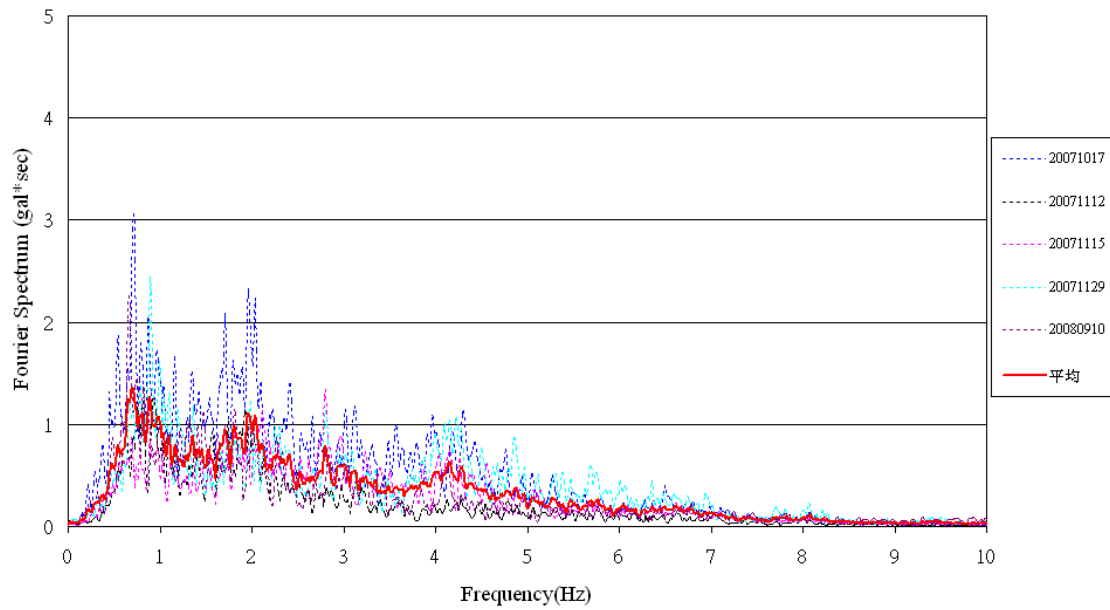


圖 7.13 臺北港地震站 1 級震度傅氏頻譜圖

台北港2007~2008年 弱震傅立葉頻譜圖(測站2級)

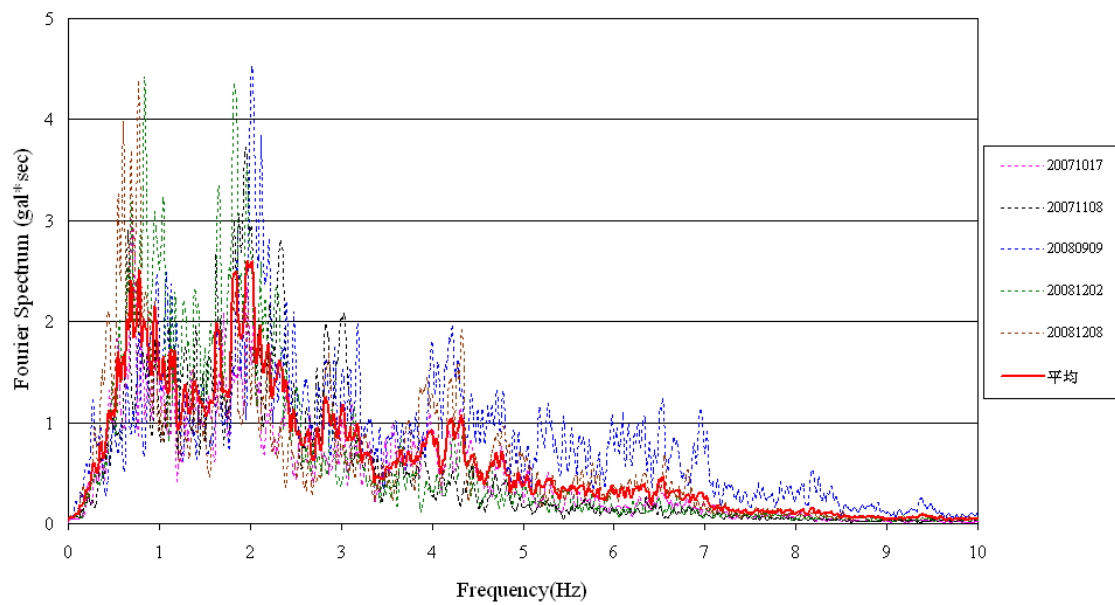


圖 7.14 臺北港地震站 2 級震度傅氏頻譜圖

台北港2008~2009年弱震傅立葉頻譜圖(測站3級)

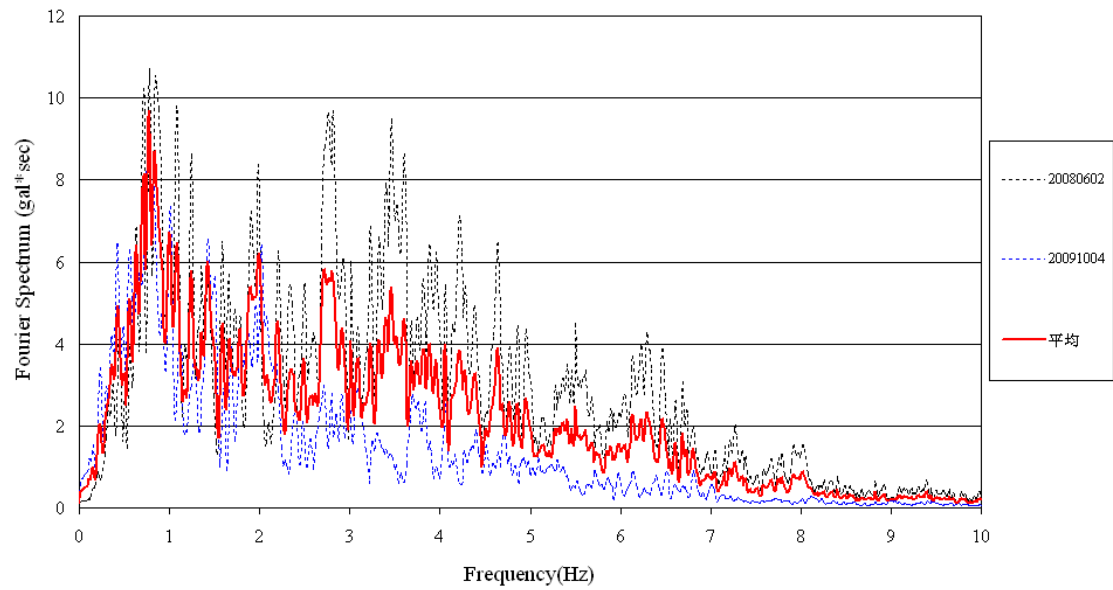


圖 7.15 臺北港地震站 3 級震度傅氏頻譜圖

台北港地震站2007~2009年地震傅立葉頻譜比較圖(測站1,2,3級)

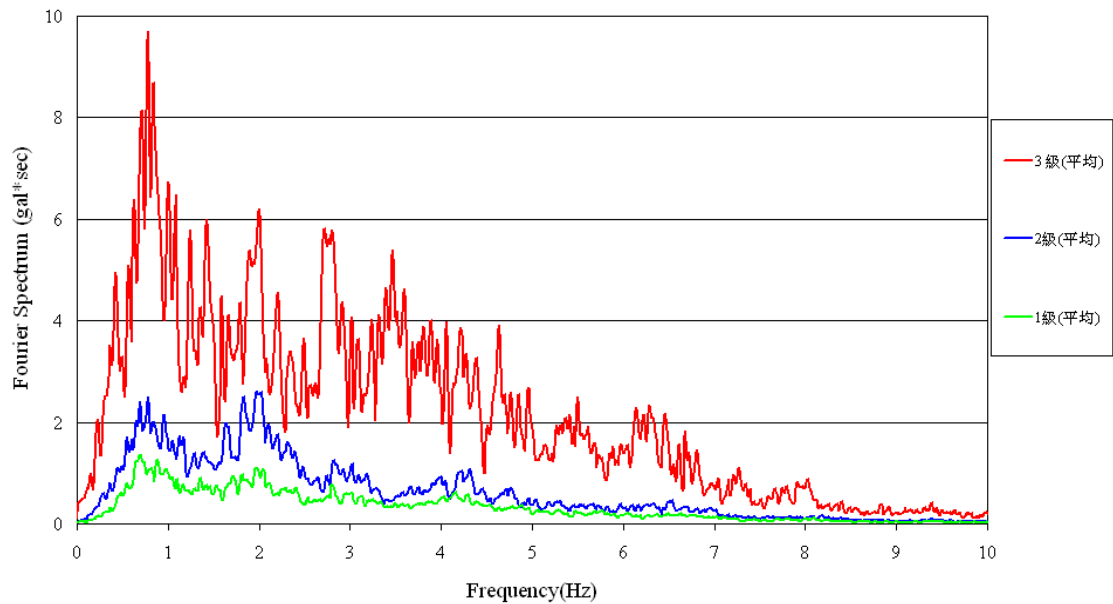


圖 7.16 臺北港地震站各級震度平均傅氏頻譜圖

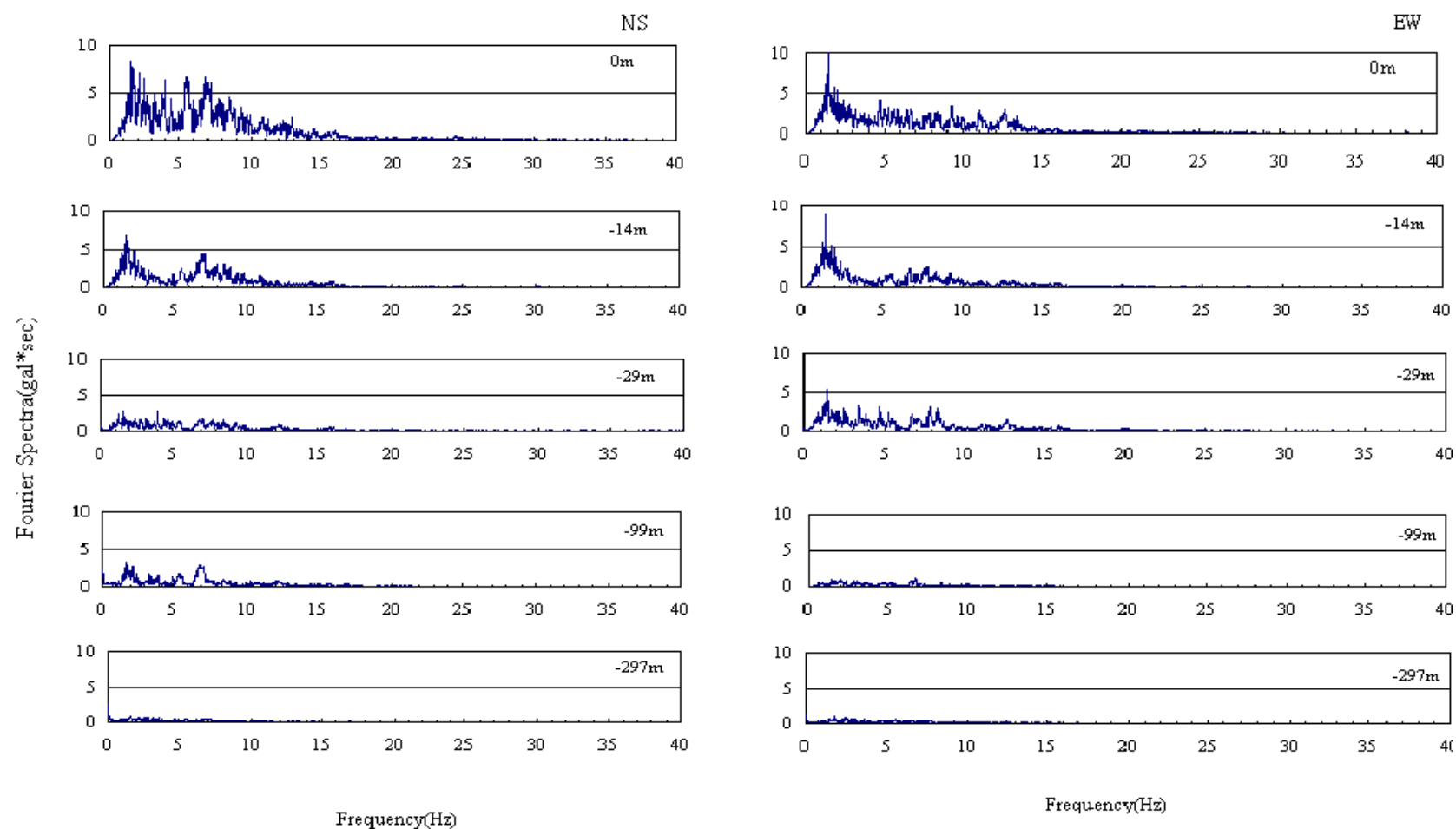


圖 7.17 臺北港地震站 2008 年 6 月 2 日地震不同深度之傅氏頻譜圖

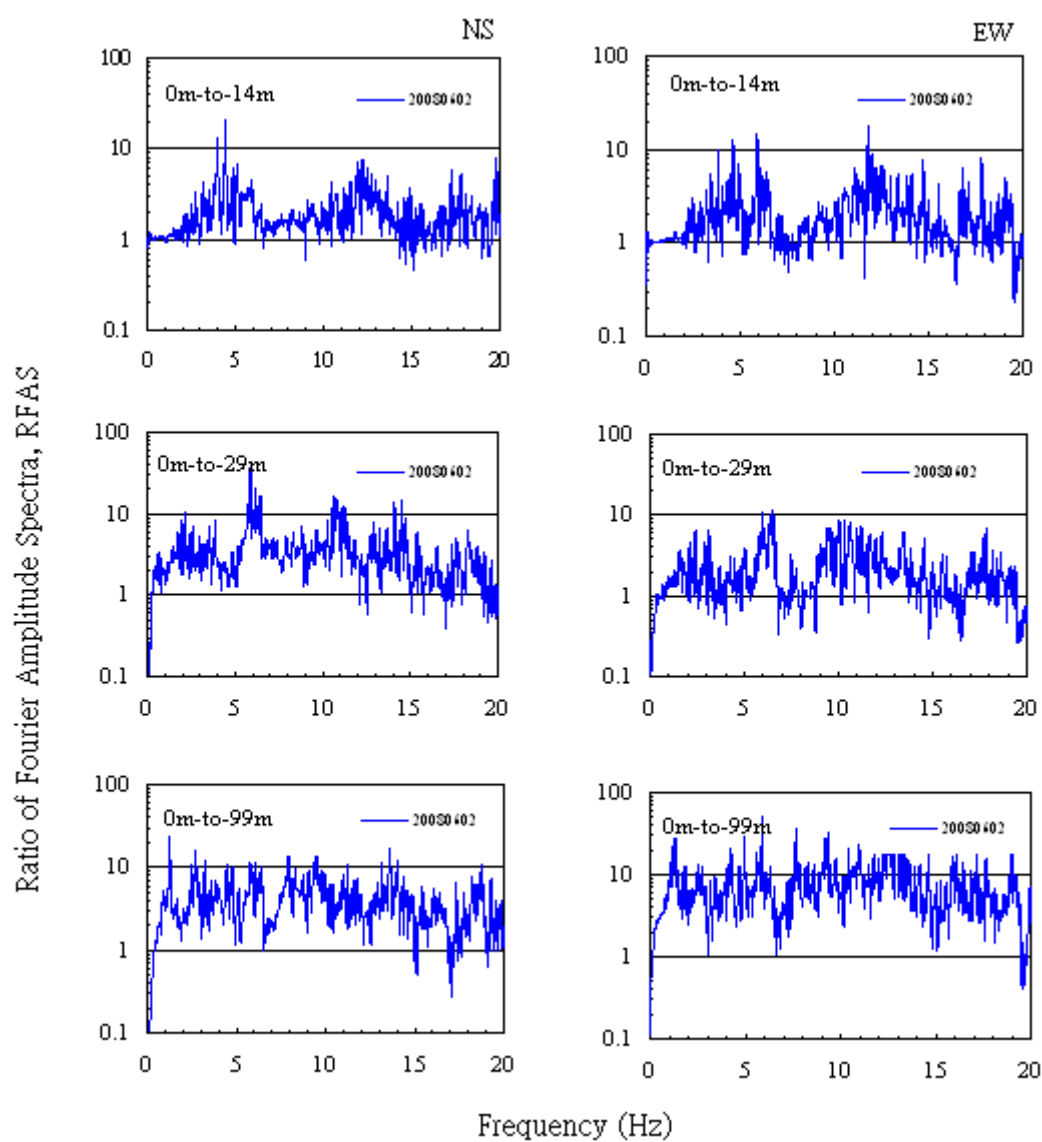


圖 7.18 臺北港地震站 2008 年 6 月 2 日地震地表相對不同深度土層之傅氏頻譜比圖

高雄港2007~2008微震傅立葉頻譜圖(測站1級)

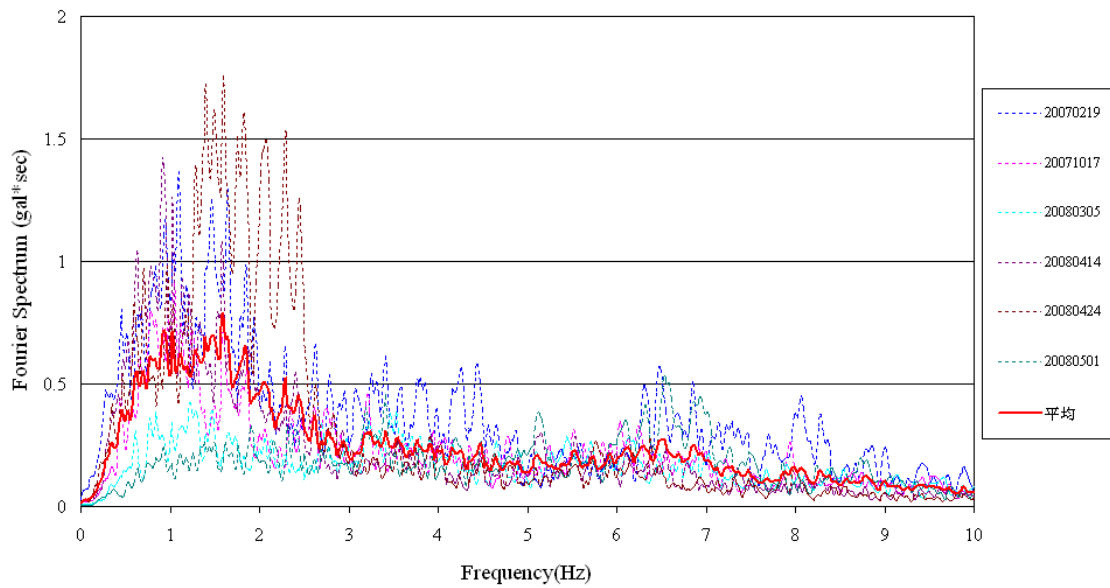


圖 7.19 高雄港地震站 1 級震度傅氏頻譜圖

高雄港2007~2008輕震傅立葉頻譜圖(測站2級)

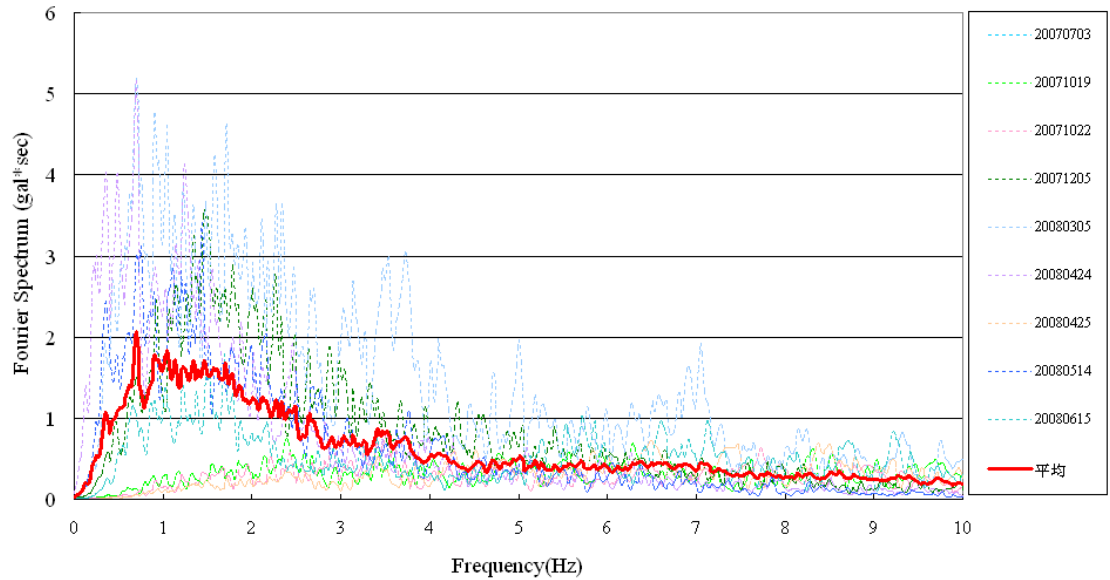


圖 7.20 高雄港地震站 2 級震度傅氏頻譜圖

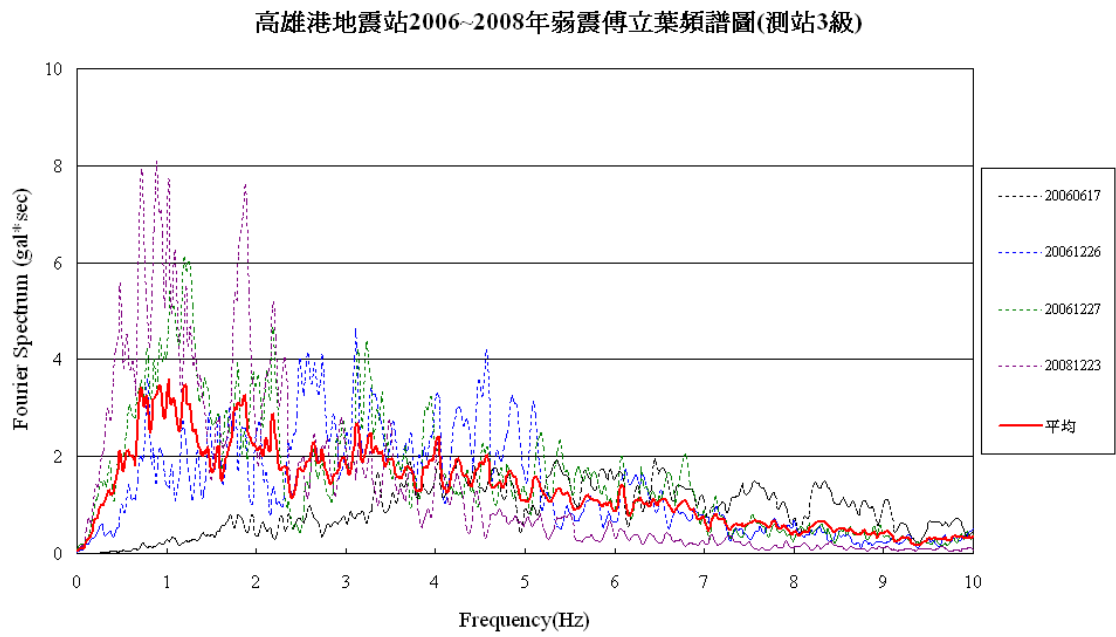


圖 7.21 高雄港地震站 3 級震度傅氏頻譜圖

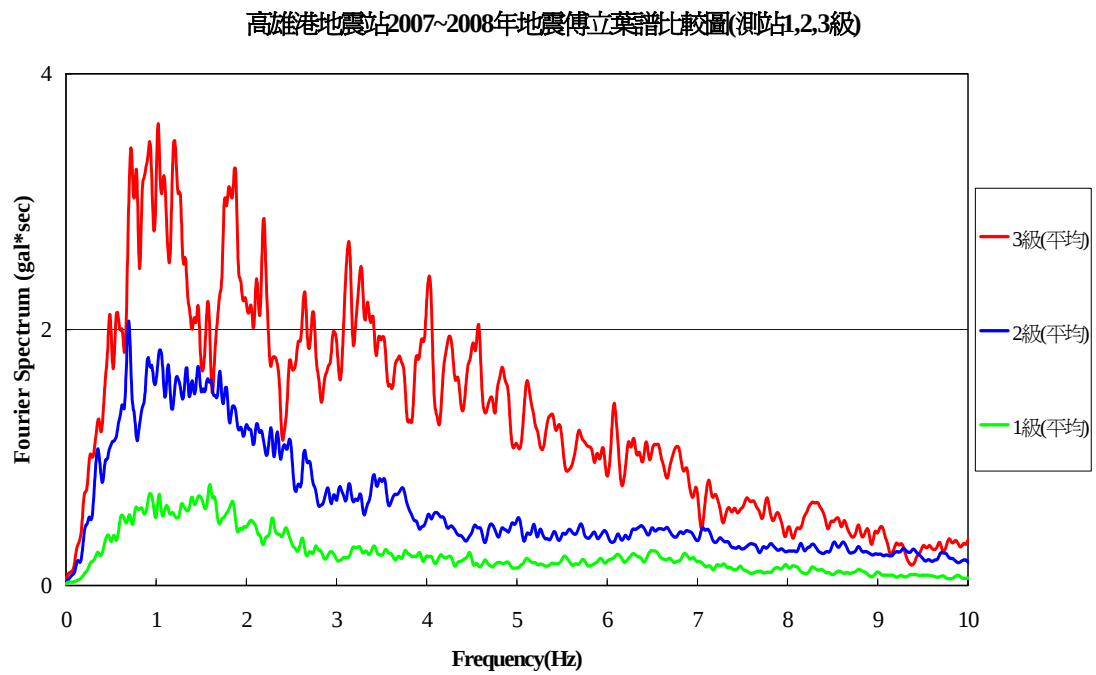


圖 7.22 高雄港地震站各級震度平均傅氏頻譜圖

7.4.3 單站頻譜比

由於港區大多為沖積土層，要選擇一個適當的岩盤參考測站並不容易，或因參考測站選擇不當，也會因為地形效應的影響，使場址效應分析結果有所差異，故雙站法並不適用於港區。於是本節採 Nakamura 在 1989 年提出單站頻譜比法之經驗式，利用微地動資料，以水平與垂直向震幅放大頻譜比(H/V amplification spectrum ratio)，分析出淺層沖積土層之共振頻率。而 Lermo and Chavez-Garcia (1993)亦從理論層狀構造來進行研究，認為此法也適用於地震之 S 波分析。茲就 Nakamura (1996, 2000)之單站頻譜比法簡述如下：

若 S_H 代表地表振動水平分量之傅氏振幅譜， B_H 為鬆軟土層底部水平分量之傅氏振幅譜，則水平向頻譜比 S_E 可以表示為

$$S_E = \frac{S_H}{B_H} \dots\dots\dots (7-6)$$

由於受到近地表雷利波(Rayleigh wave)之影響，在地表所紀錄到之水平向振幅 S_H 會大於地下岩盤測站之水平向振幅 B_H 。

利用垂直向頻譜比 A_S ，代表震源放大作用

$$A_S = \frac{S_V}{B_V} \dots\dots\dots (7-7)$$

S_V 代表地表振動垂直分量之傅氏振幅譜， B_V 為鬆軟土層底部垂直分量之傅氏振幅譜。為了除去震源放大效應，將(3-4)式除以(3-5)式，即

$$S_M = \frac{S_E}{A_S} = \frac{\left[\frac{S_H}{B_H} \right]}{\left[\frac{S_V}{B_V} \right]} = \left[\frac{\frac{S_H}{B_H}}{\frac{S_V}{B_V}} \right] \dots\dots\dots (7-8)$$

上式中之分母 $\frac{B_H}{B_V}$ ，Nakamura 曾利用井下微地動觀測資料得到其值約等於 1。但是一般岩盤站 H/V ratio 由於受到其地下土層形貌影響，此比值不會這麼穩定，但大約會在某個定值附近來回震盪。利用以上

關係，即可得到單站頻譜比法此一經驗式：

$$S_M = \frac{S_H}{S_V} \dots\dots\dots (7-9)$$

簡言之，就是利用單一測站之水平向傅氏頻譜除以垂直向傅氏頻譜，即可估計此筆地震對此測站區域所造成的場址效應。

本節彙整 2006 年至 2008 年期間高雄港地震站之 PGA 小於 25gal 的弱地震資料與 2006 年恆春強震資料，分析測站地區強震與弱震之場址效應差異。先利用單站頻譜比法計算測站的弱震平均場址效應，再將強震之單站頻譜比值與測站弱震之平均頻譜進行相互比對，觀測地震期間測站地區之場址效應變化，並進而探討測站在地震時是否有非線性反應發生。

1. 監測站弱震平均頻譜比

利用 Nakamura 單站頻譜比法之經驗式來估計高雄港地震站之場址效應，即採用測站之真實地震歷時紀錄之 S 波資料，將地震資料由時間域轉至頻率域，藉由單站頻譜比法得到的單一水平向(取東西向及南北向頻譜值均方根)與垂直向頻譜的比值，可探討地震作用時，震波在測站區域的放大效應。

高雄港區蒐集 2005 至 2008 年地震監測站地表地震儀所記錄的弱震資料約 30 餘筆中，共選取高雄港測站最大地表加速度小於 25gal(3 級地震) 較完整之 30 筆弱震資料，先將個別的地震進行單站頻譜比法後，再將所得之頻譜比值加以平均，以降低震源效應的影響，最後可得到測站之弱震平均場址效應，如圖 7.23，由圖中可知，放大主頻大約分佈於 0.6~1.3Hz。

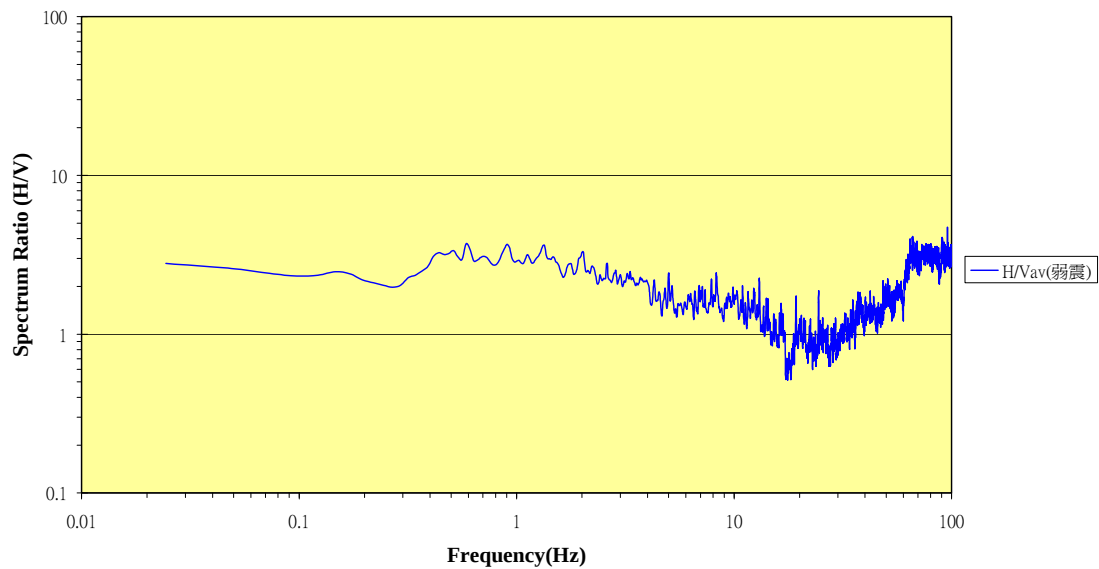


圖 7.23 高雄港地震站弱震單站平均頻譜比

2. 監測站強、弱震頻譜比

2006 年於恆春外海發生規模 7.0 之強烈地震，造成屏東恆春地區一些災情，於恆春南灣地區亦有土壤液化災情，顯示恆春地區可能有土壤非線性反應的災害發生，本文依據設置於高雄港地震站監測所得資料進行單站頻譜比分析，測站於 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分監測之地震，測站震度 5 級，地表最大加速度為 96gal，如圖 7.24，選取水平兩方向頻譜值均方根與垂直向頻譜值比後，如圖 7.25 所示。

將測站強、弱震頻譜比資料比對結果，在低頻帶部份 0.12Hz 以下呈現線性反應並無放大現象，0.3Hz~1.3Hz 出現明顯的線性放大反應，但在 8.3Hz~28Hz 之間強震頻譜比小於弱震平均頻譜比值，土壤出現非線性反應，如圖 7.26，測站土壤雖有非線性放大現象，但是高雄港區並無土壤液化災情發生。

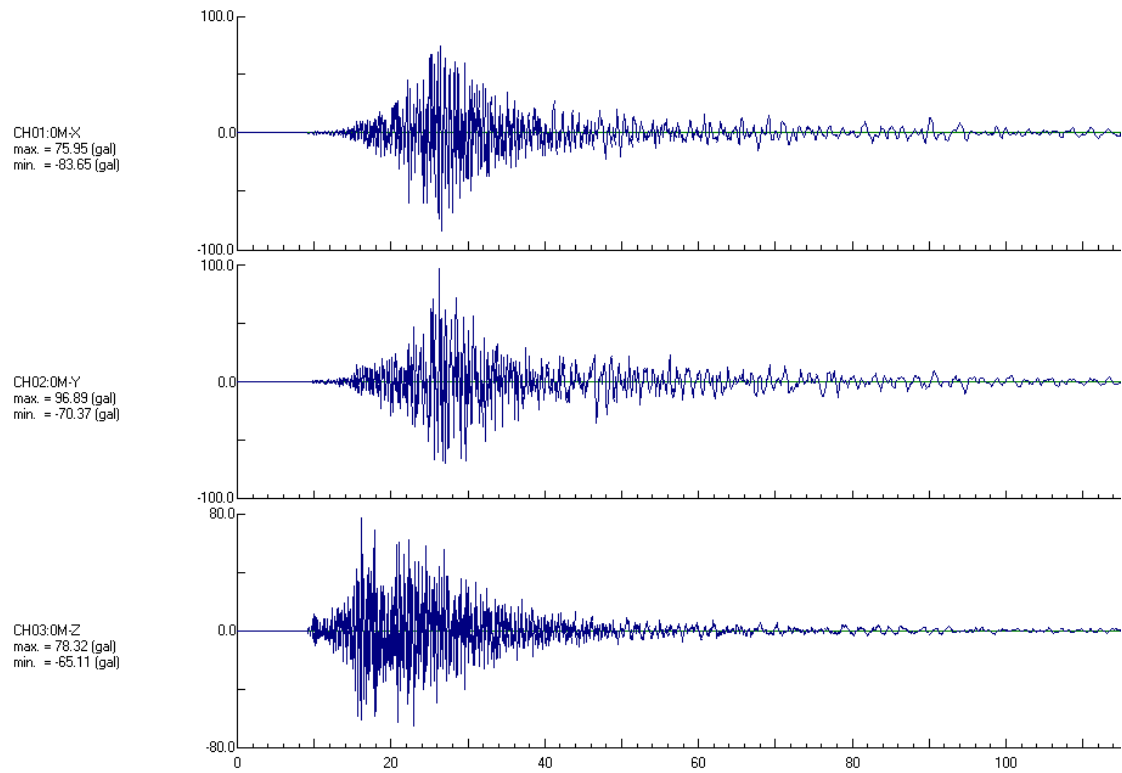


圖 7.24 高雄港測站 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分地震加速度歷時

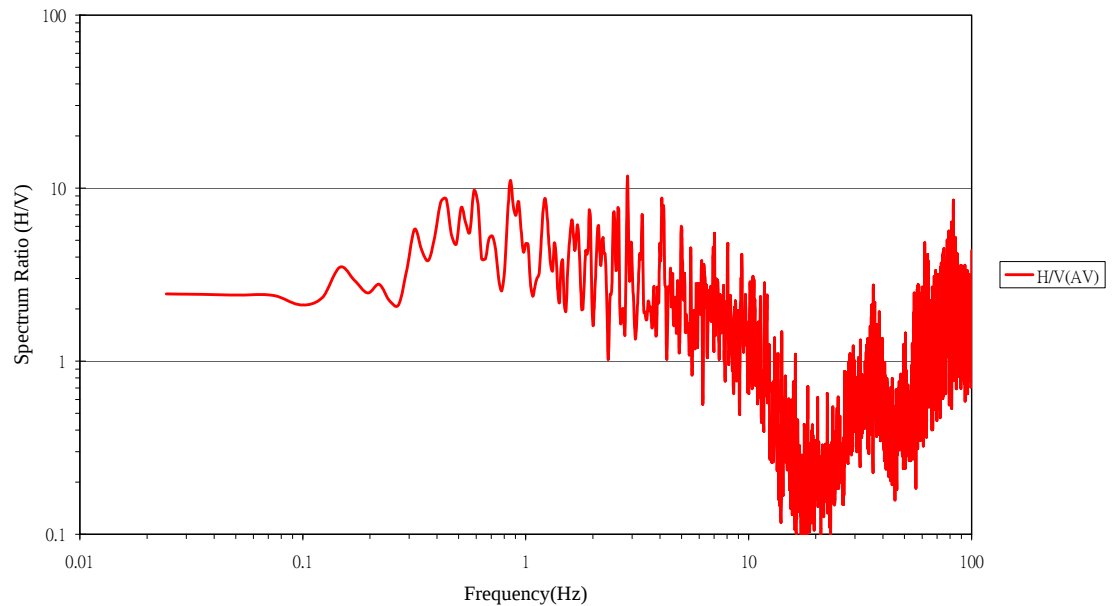


圖 7.25 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分強震頻譜比

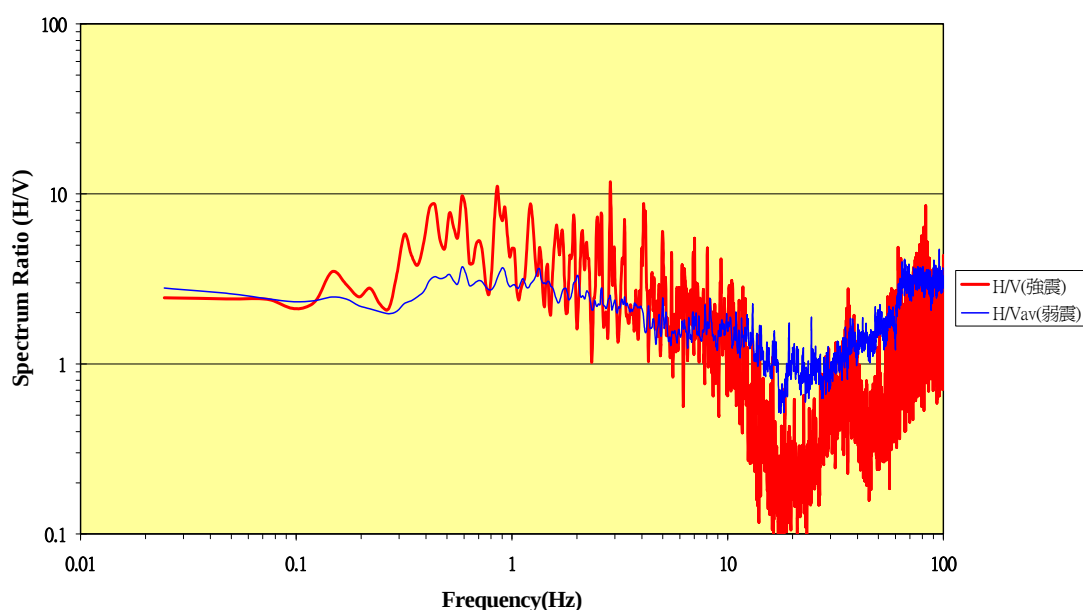


圖 7.26 高雄港地震站強、弱震單站頻譜比

7.4.4 反應頻譜分析

2006 年於恆春外海發生規模 7.0 之強烈地震，分別為 12 月 26 日 20 時 26 分及 20 時 34 分之恆春地震，其震央位置在屏東墾丁與恆春西南方約 30 餘公里，其震度分佈如圖 7.27 及圖 7.28 所示。高雄港井下地震站監測到兩筆震度 4 級以上之地震資料。12 月 26 日 20 時 26 分之地震，規模 7.0，地震深度 44 公里，測站距離震央約 94.9 公里，地表最大加速度為 46gal。12 月 26 日 20 時 34 分之地震，規模 7.0，地震深度 50.2 公里，測站站距離震央約 94.9 公里，地表最大加速度為 96gal。

2010 年於高雄發生規模 6.4 之強烈地震，即 2010 年 03 月 04 日 08 時 18 分之甲仙地震，震央位置在高雄甲仙東南方 17 公里處，地震深度 22.6 公里，震度分佈如圖 7.29。測站距離震央約 56.6 公里，地表最大加速度為 75gal。

高雄港地震監測站記錄恆春地震與甲仙地震之 3 筆地表加速度歷時地震資料，如圖 7.30 所示。選擇 12 月 26 日 20 時 34 分恆春地震之東西向地表最大加速度進行反應譜分析後，如圖 7.31~圖 7.33。阻尼比

分別為 0%、2%、5%及 10%，繪製成三相圖後，如圖 7.34，當 $T=\infty$ 時，最大地表位移 $S_D \cong 12\text{cm}$ ，當 $T=0$ 時，最大地表加速度 $S_A \cong 96\text{cm}/\text{sec}^2$ 。

本節依據 2005 年耐震設計規範之規定，進行 2006 年恆春地震對數個震度較大測站之實測反應譜分析，藉以評估規範對該鄉鎮建築結構物是否在安全範圍內。各圖中紅色虛線代表當地 475 年回歸期之設計地震反應譜，依耐震設計規範之規定繪製，各地鄉鎮之工址短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數皆不同，各站之 S_S^D 、 S_1^D 值、反應譜等加速度段工址放大係數 F_a 與反應譜等速度段工址放大係數 F_v ，如表 7-7 所示。

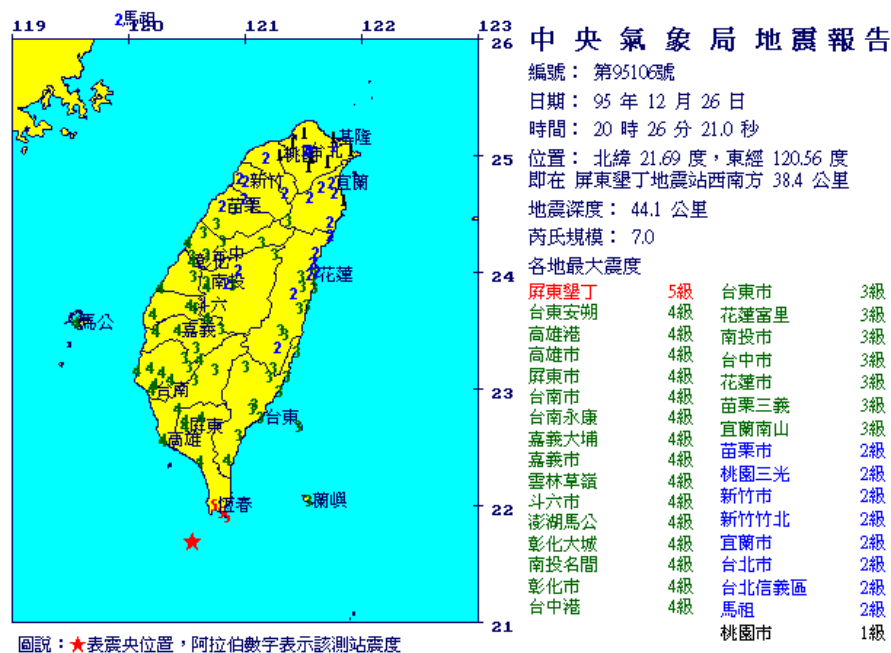


圖 7.27 2006 年 12 月 26 日 20 時 26 分恆春地震震度分布(中央氣象局)

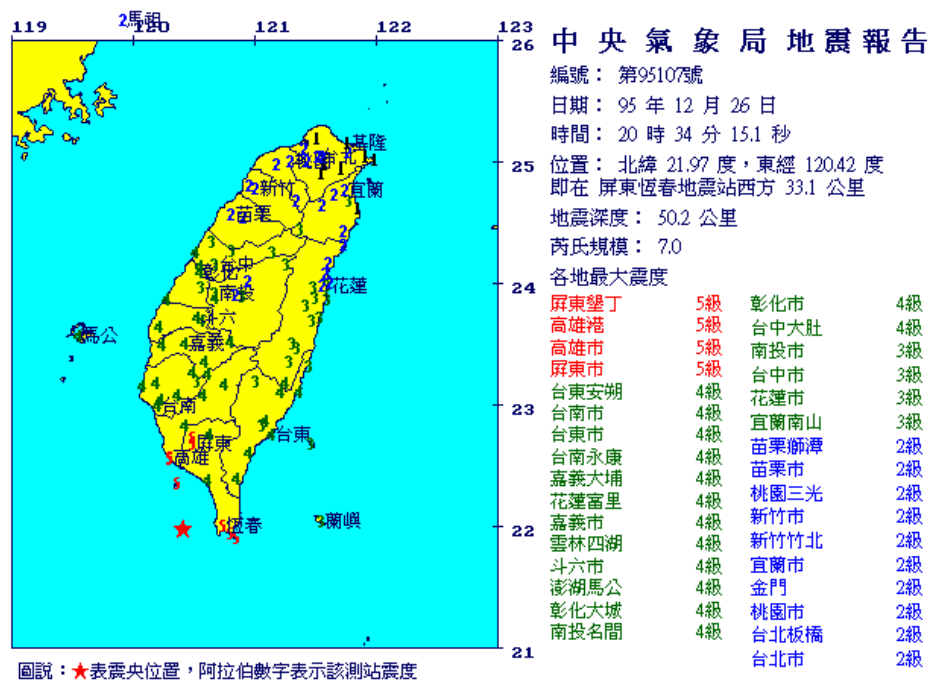


圖 7.28 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分恆春地震震度分布(中央氣象局)

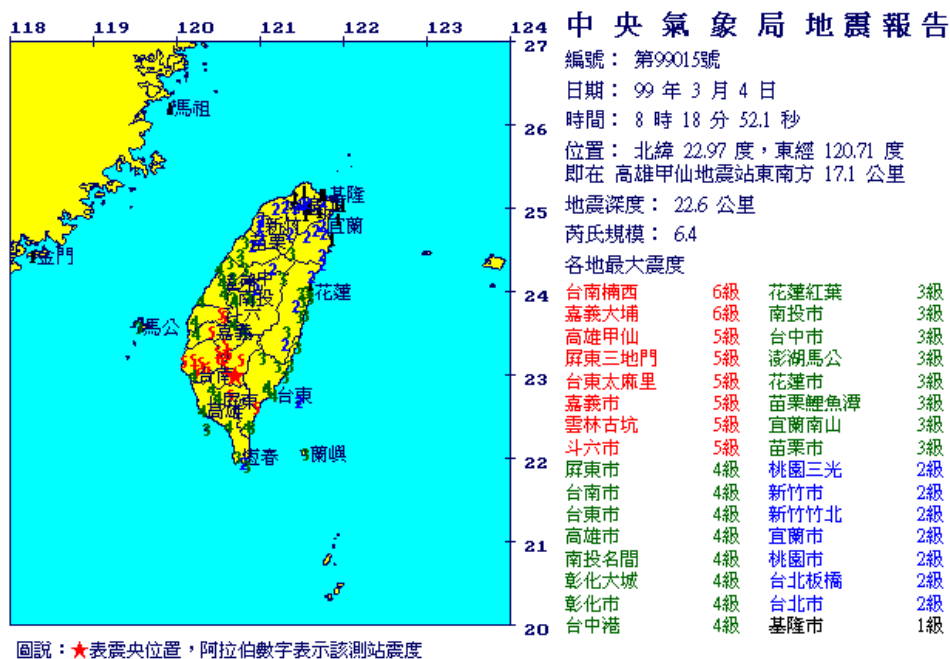


圖 7.29 2010 年 03 月 04 日 08 時 18 分甲仙地震震度分布(中央氣象局)

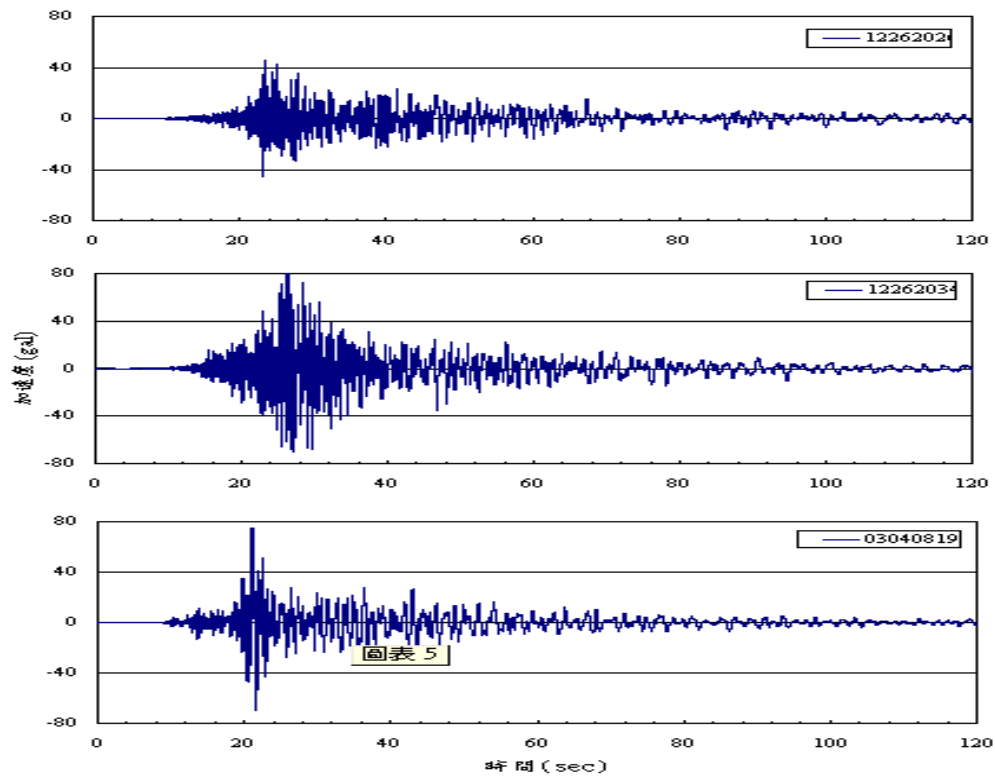


圖 7.30 高雄港 2006 年 12 月 26 日及 2010 年 3 月 4 日地震(東西向)

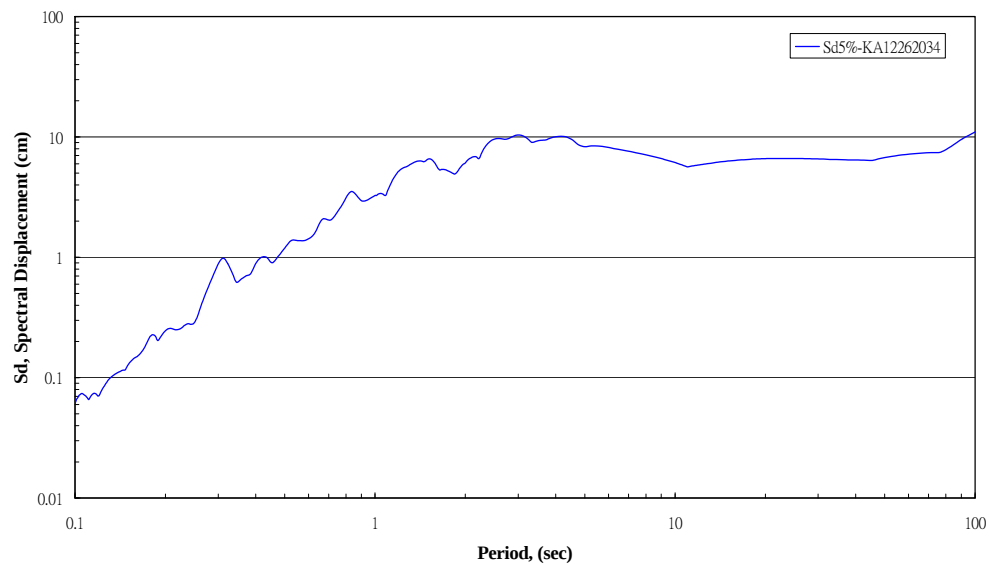


圖 7.31 高雄港監測站 2006 年 12 月 26 日 20 時 34 分地震之位移反應譜($\zeta=5\%$)

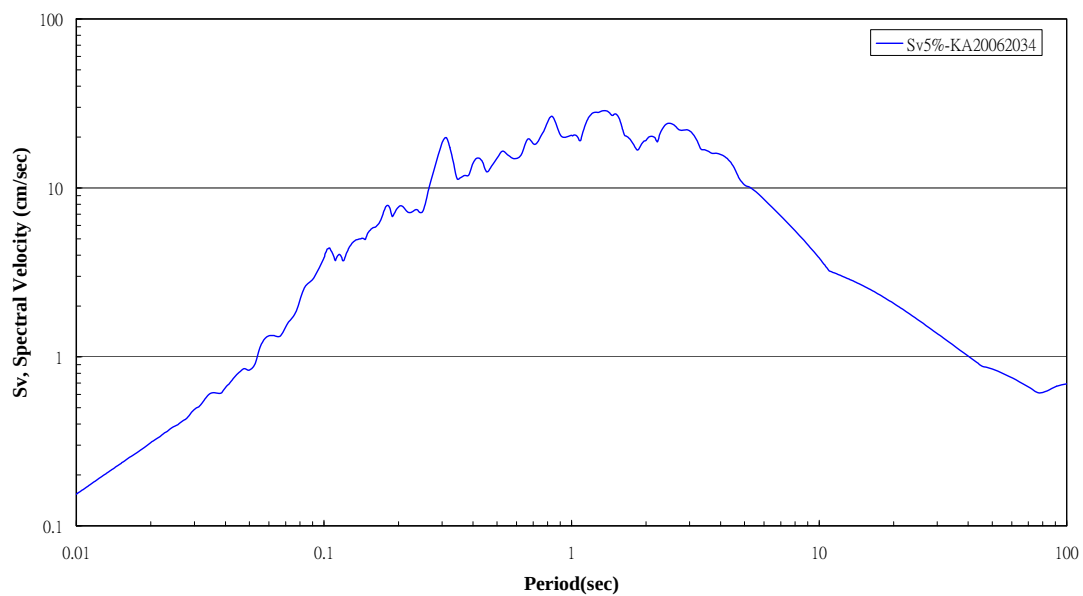


圖 7.32 高雄港監測站 2006 年 12 月 26 日地震之速度反應譜($\zeta=5\%$)

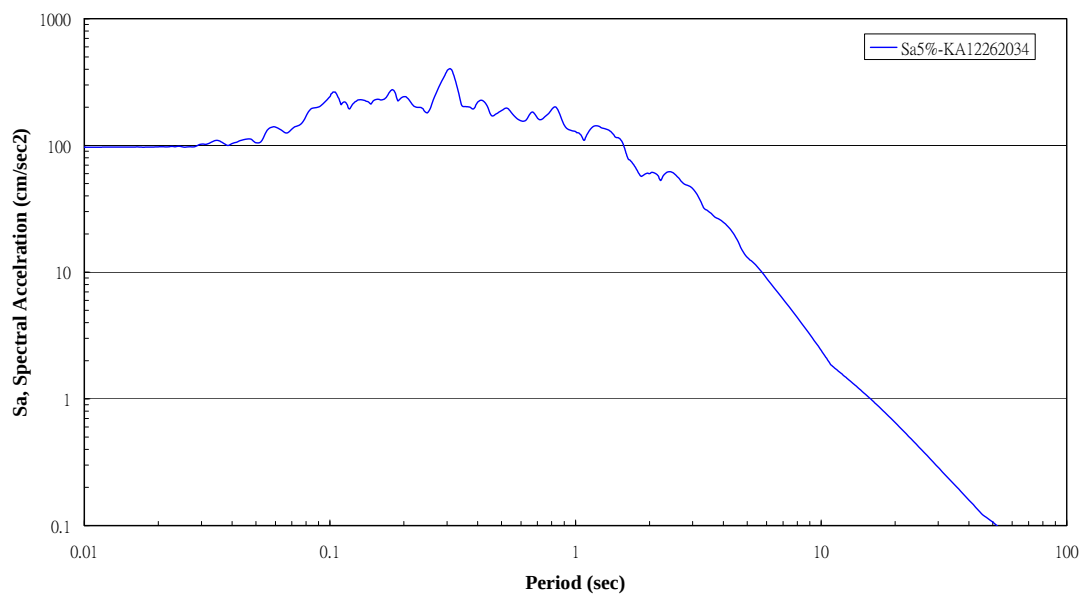


圖 7.33 高雄港監測站 2006 年 12 月 26 日地震之加速度反應譜($\zeta=5\%$)

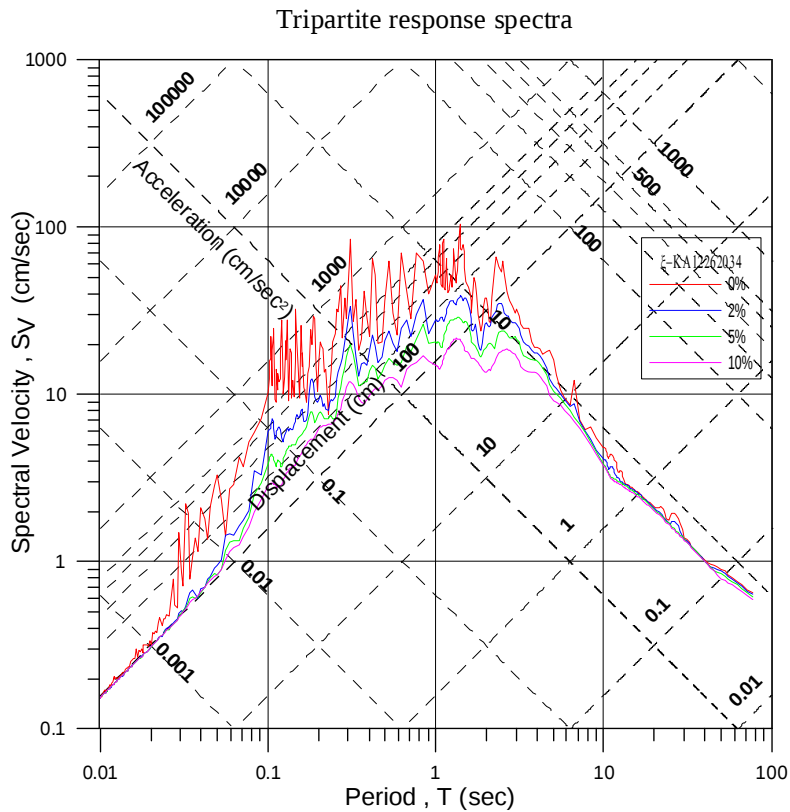


圖 7.34 高雄港地震監測站恆春地震反應譜三相圖(2006/12/26, 20:34)

表 7-7 工址短週期與一秒週期之設計水平譜加速度係數

鄉鎮市區	S_S^D	S_1^D	F_a (地盤係數)	F_v (地盤係數)
恆春鎮	0.5	0.3	1.0	1.0
滿州鄉	0.5	0.3	1.0	1.0
鼓山區	0.7	0.35	1.0	1.4
旗津區	0.6	0.35	1.1	1.4
安南區	0.7	0.4	1.0	1.3
七股鄉	0.7	0.4	1.0	1.3

本節以 2006 年恆春地震引起各測站之實測反應譜加速度圖與耐震設計規範進行比較，經初步比較結果如圖 7.35~圖 7.40 所示，各測站中以滿州國小、墾丁國小及恆春氣象站等地區將會有建築結構物於此次地震中損壞，而高雄氣象站、高雄港區與七股氣象站等區結構物則在安全範圍內，高雄港地區如將 PGA 放大到 0.15g 時介於設計規範內。

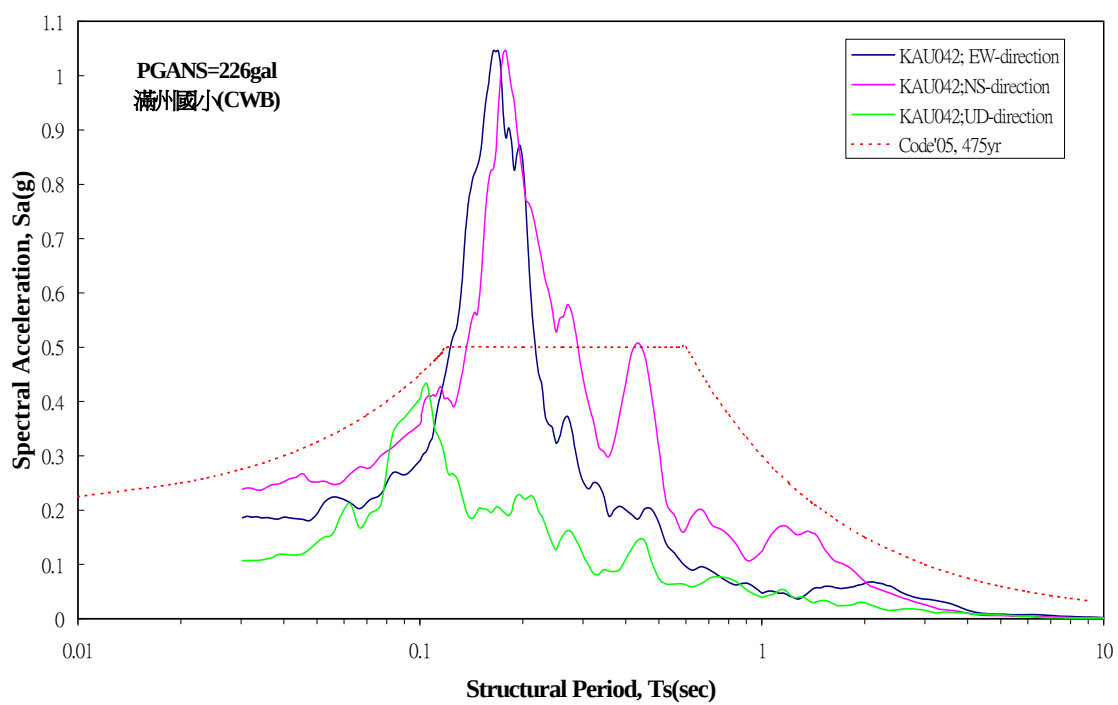


圖 7.35 滿州國小(KAU042)地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

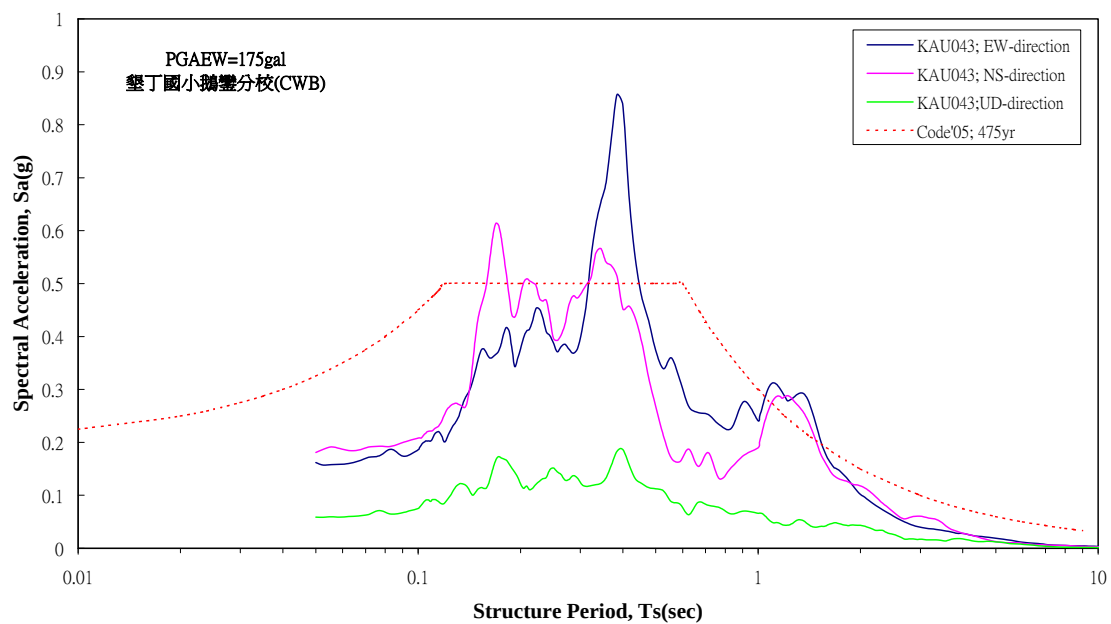


圖 7.36 墾丁國小(KAU043)地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

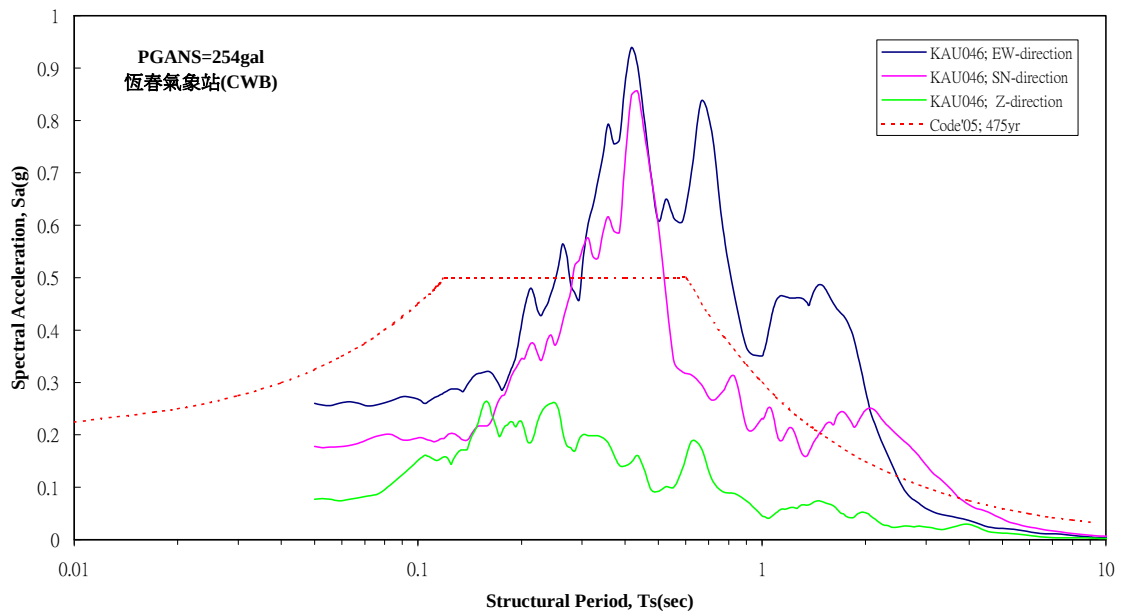


圖 7.37 恆春氣象地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

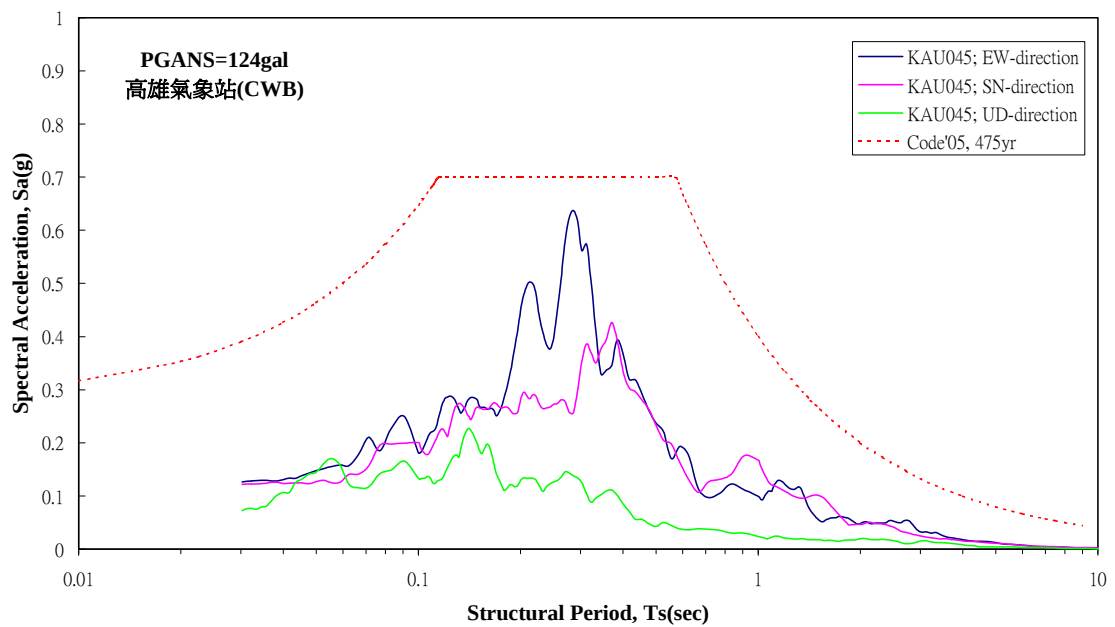


圖 7.38 高雄氣象地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

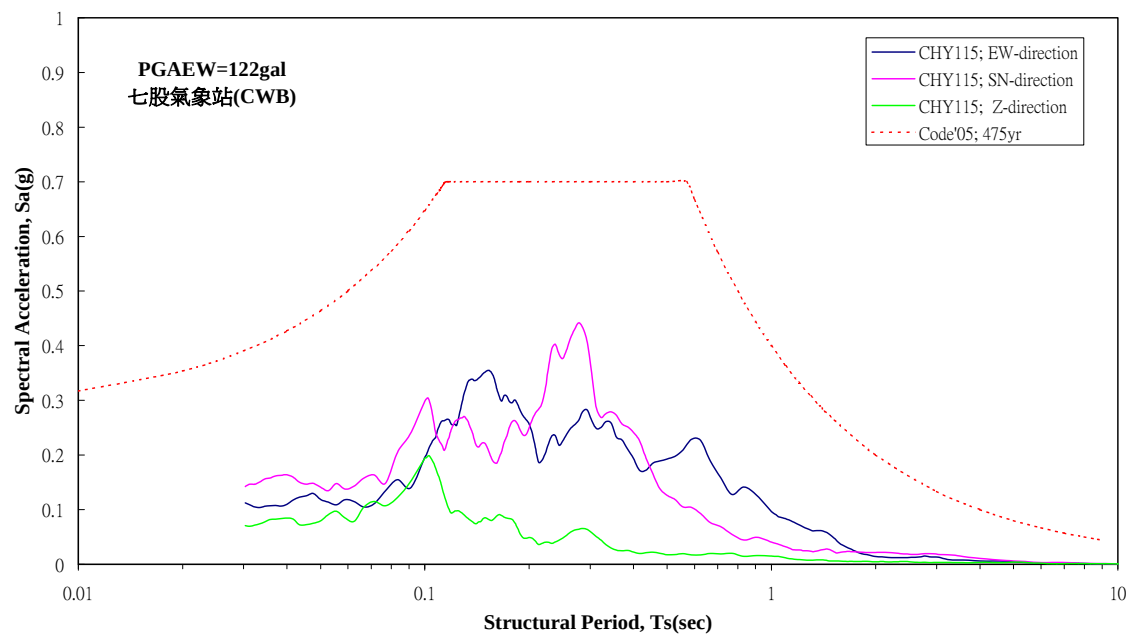


圖 7.39 七股氣象地震站實測反應譜圖(中央氣象局)

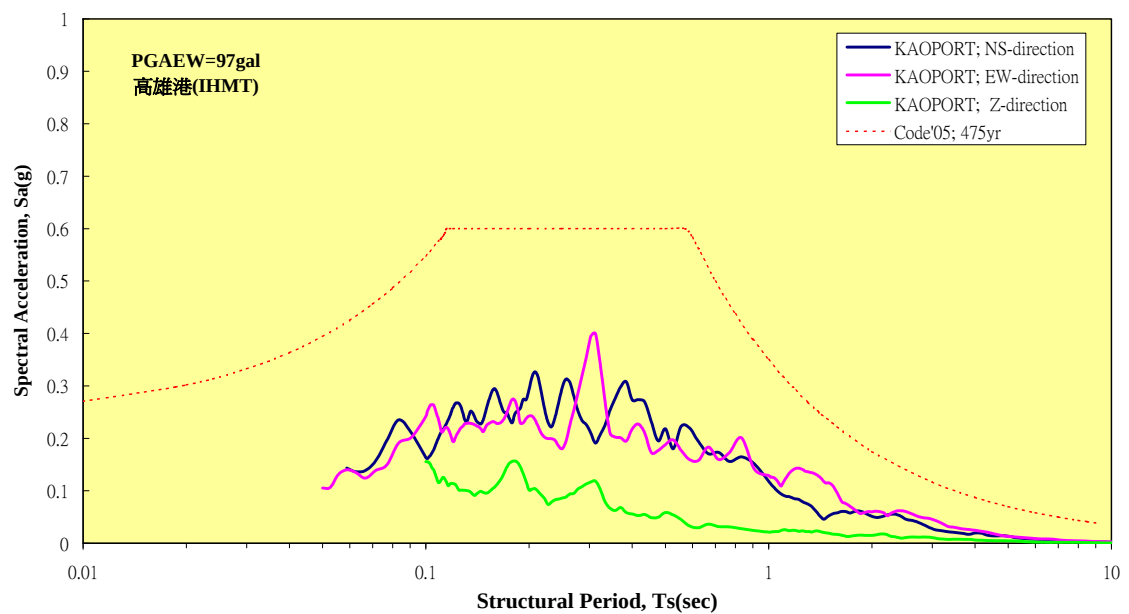


圖 7.40 高雄港地震站實測加速度反應譜圖(港研中心)

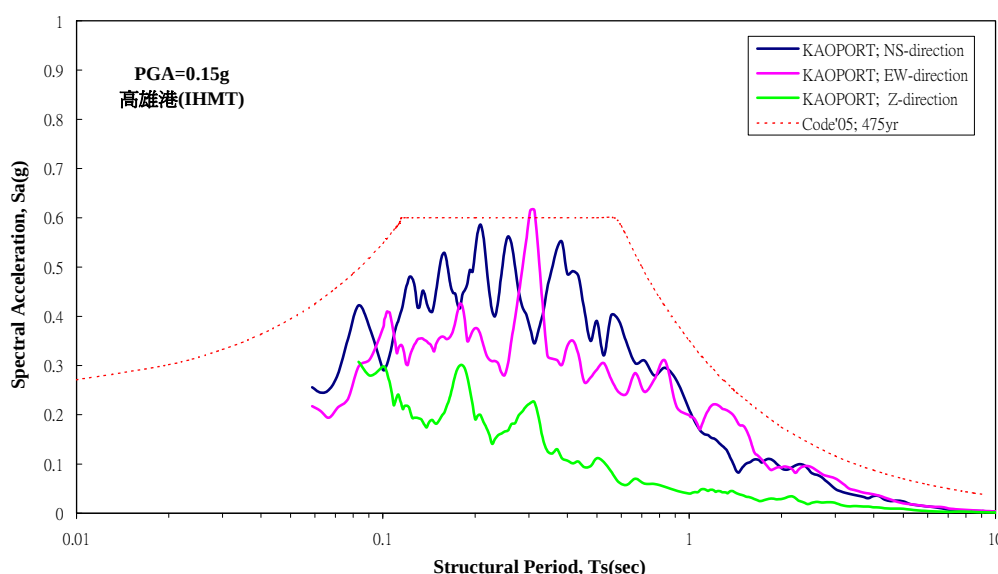


圖 7.41 高雄港地震站加速度反應譜圖(0.15g)

7.5 時頻分析

時頻分析(Time-Frequency Analysis)是逸奇科技公司研發的 Visual Signal 訊號分析軟體工具，TFA 模組群它提供了 Short-Term Fourier Transform(短時傅立葉轉換)、Morlet Transform(小波轉換)及 Hilbert Spectrum(計算每個時間點的瞬時頻率)等時頻分析的計算，本節嘗試以該公司提供的試用版軟體，進行分析 2006 年恆春地震於高雄港地震站監測的資料，如圖 7.42 所示，即應用 Visual Signal 軟體，以 EMD (Empirical Mode Decomposition _ Huang et al., 1998)模組先行作經驗模態分解，從而可得其隱模態函數組(IMFs_Intrinsic Mode Functions)，再透過 HHT (Hilbert-Huang Transform _ Huang et al., 1998)模組作時頻分析並計算邊際頻譜(marginal spectrum)，進而可得相關之時頻圖及能譜圖，如圖 7.43 至圖 7.45 所示，由圖 7.45 可知地震波振盪主頻為 0.4Hz 之低頻。

一般在研究土壤場址效應時，是將地表與井下測站之地震紀錄波訊號，進行傅立葉轉換自時間訊號轉換至頻率域，再利用雙站頻譜比法，將地表與井下水平向的頻譜相除，其比值即代表各個頻率的土壤放大因子，而其頻譜比之第一峰值所在的頻率，即為兩測站間土層之共振主頻。

由於土壤受到較大之地震作用將會改變其共振主頻，如果採用一般之傅氏頻譜分析僅能得知地震共振主頻的不同，卻無法得知主頻發生變化與時間的關係。因此本節亦利用 Visual Signal 軟體之短時傅氏轉換法(Short-Term Fourier Transform)分析高雄港測站之 2006 年恆春地震訊號，再加上利用雙站頻譜比法，將地表與井下-14.7m 之頻譜比相除，其比值最大值所在之頻率，即是共振主頻。利用上述方法進行 2006 年 10 月 9 日微震及 2006 年 12 月 26 日強震 2 筆地震資料後，如圖 7.46~圖 7.47，強震時其主頻約為 2.4Hz，弱震時之主頻約為 4.4Hz，由圖可知共振主頻隨 PGA 值增大而往低頻移動，圖中橫軸為訊號的時間軸，縱軸為頻率，圖的顏色代表強度。

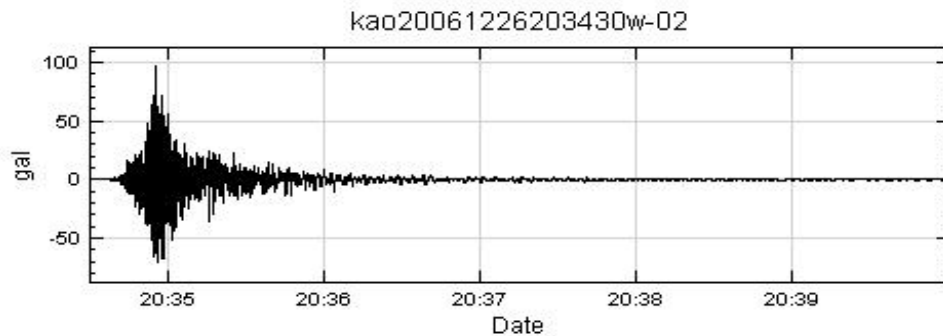


圖 7.42 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震 PGA 圖

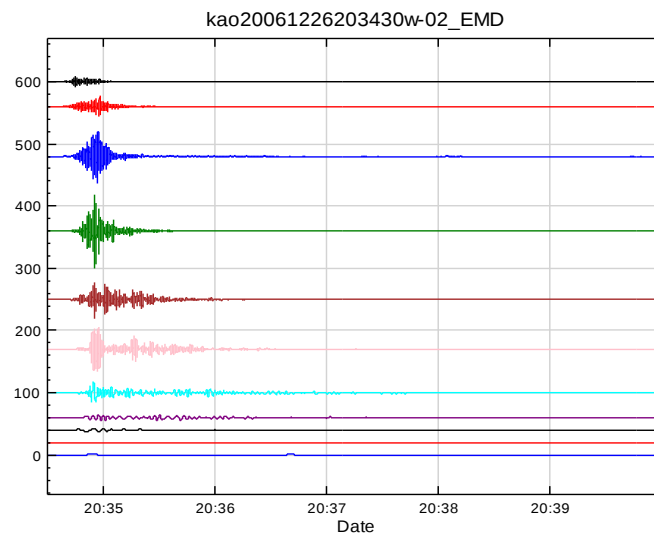


圖 7.43 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震隱模態函數組圖 (IMFs_Intrinsic Mode Functions)

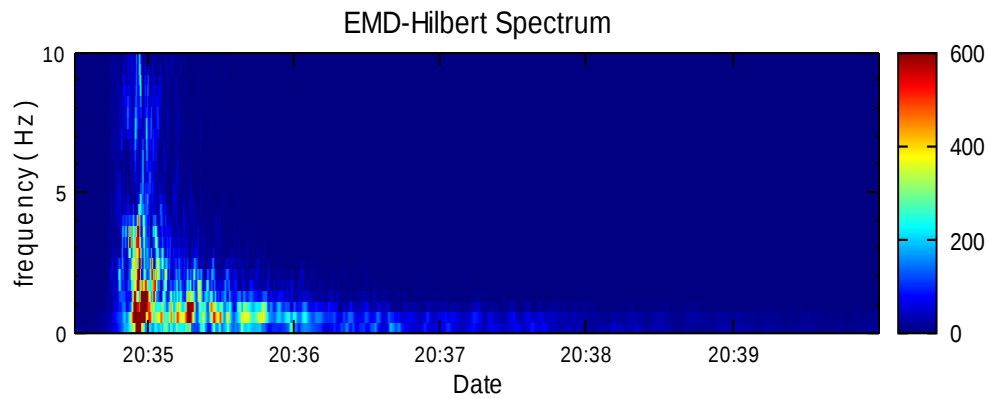


圖 7.44 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震(HHT)時頻分析圖

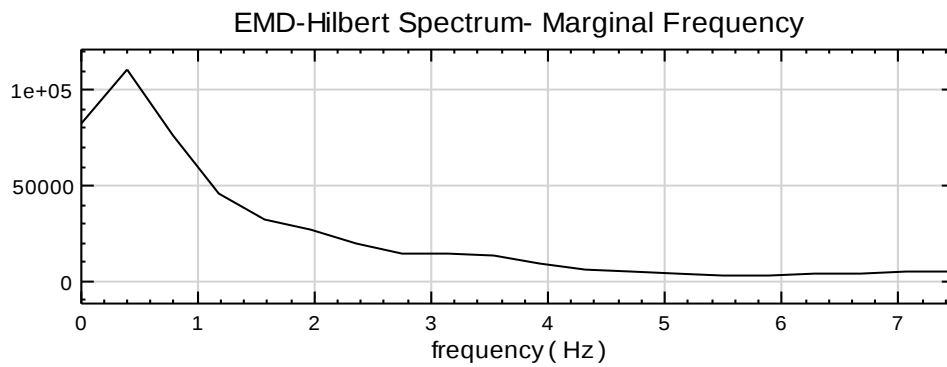


圖 7.45 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日恆春地震能譜圖

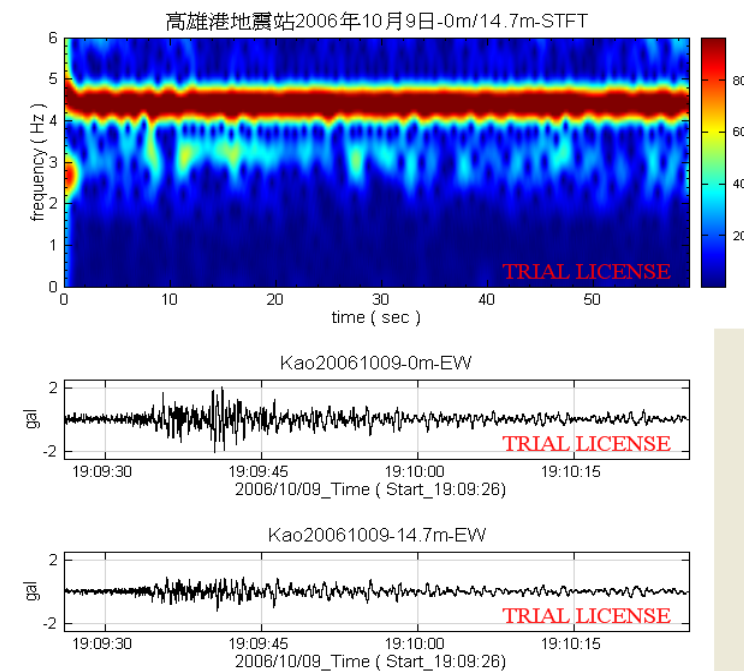


圖 7.46 高雄港地震站 2006 年 10 月 9 日地震 STFT 法頻譜比圖

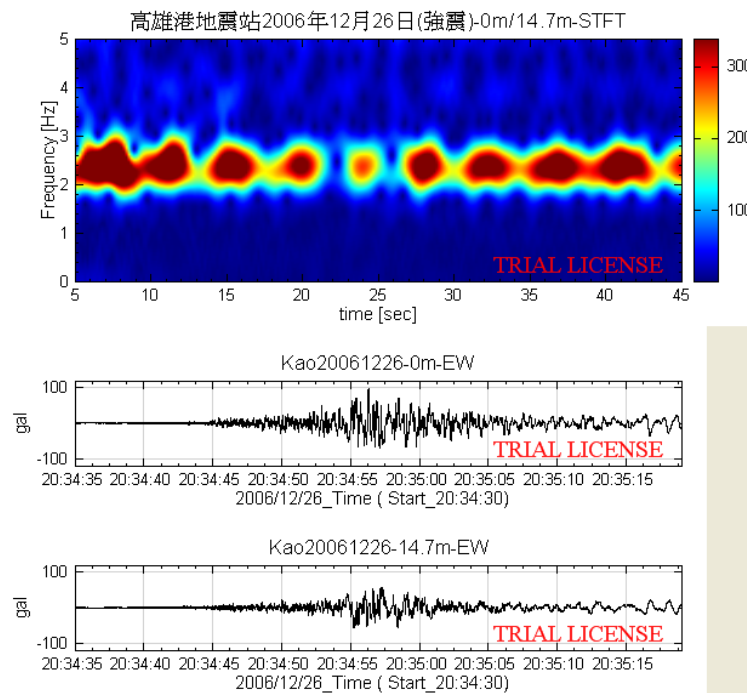


圖 7.47 高雄港地震站 2006 年 12 月 26 日地震 STFT 法頻譜比圖

7.6 港灣地區地震資訊網

本網站利用各港設置之地震及動態孔隙水壓監測系統，將監測所得資料結合港研中心建立之港灣環境資訊網站，建置於港區地震資訊中，以利於查詢，港區地震資訊網及查詢圖如圖 7.48 至圖 7.53 所示。

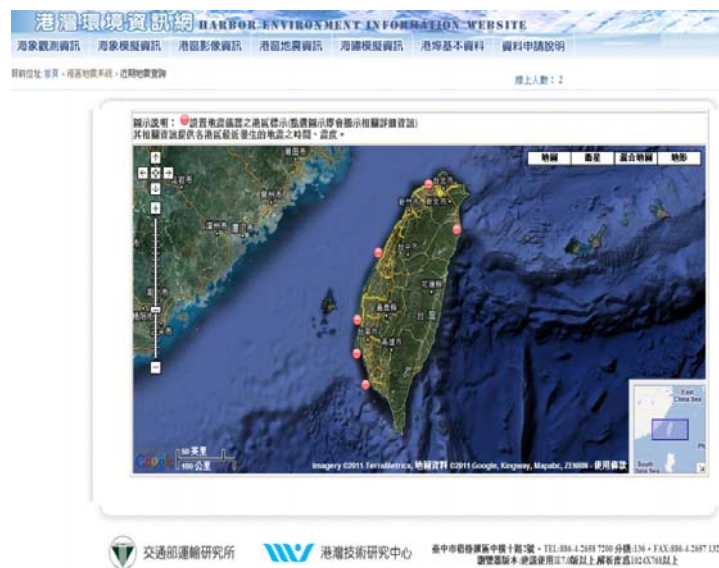


圖 7.48 港區地震資訊網示意圖



圖 7.49 港區地震資訊網連結地震查詢圖

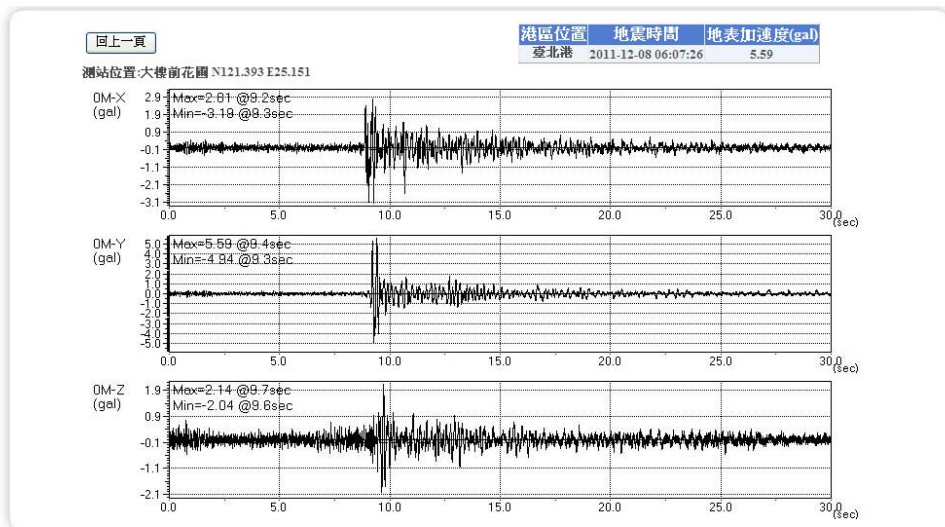


圖 7.50 港區近期地震查詢圖

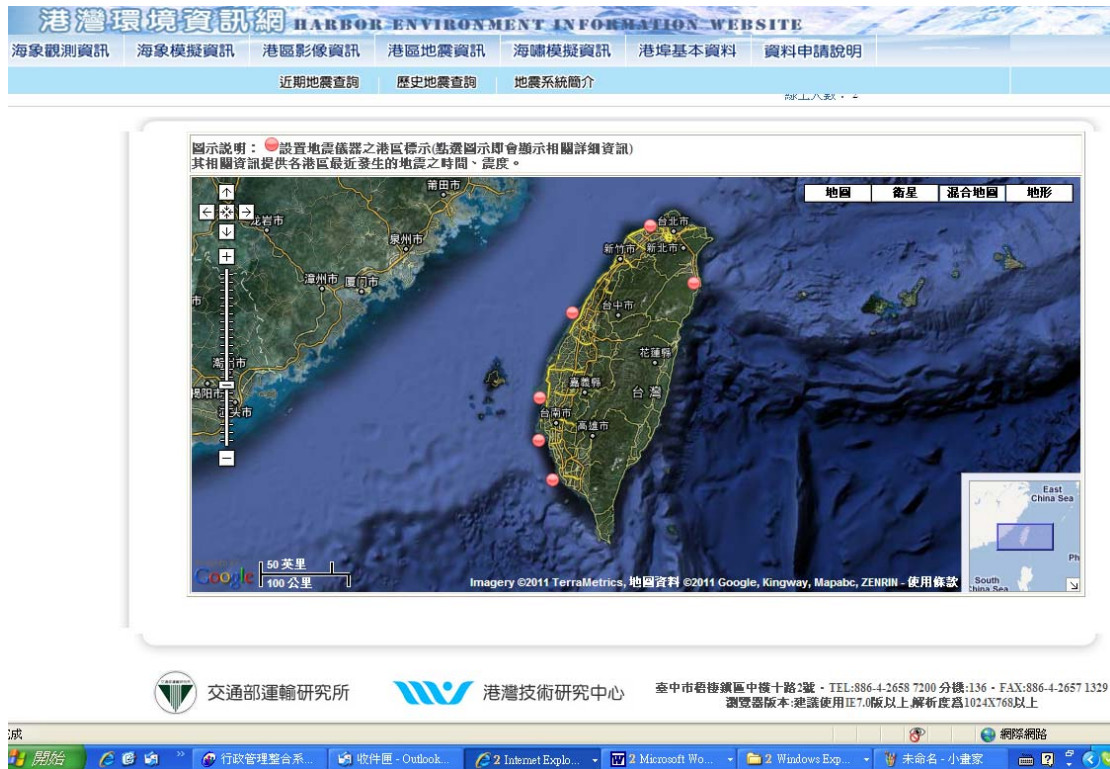


圖 7.51 港區歷史地震資訊查詢圖

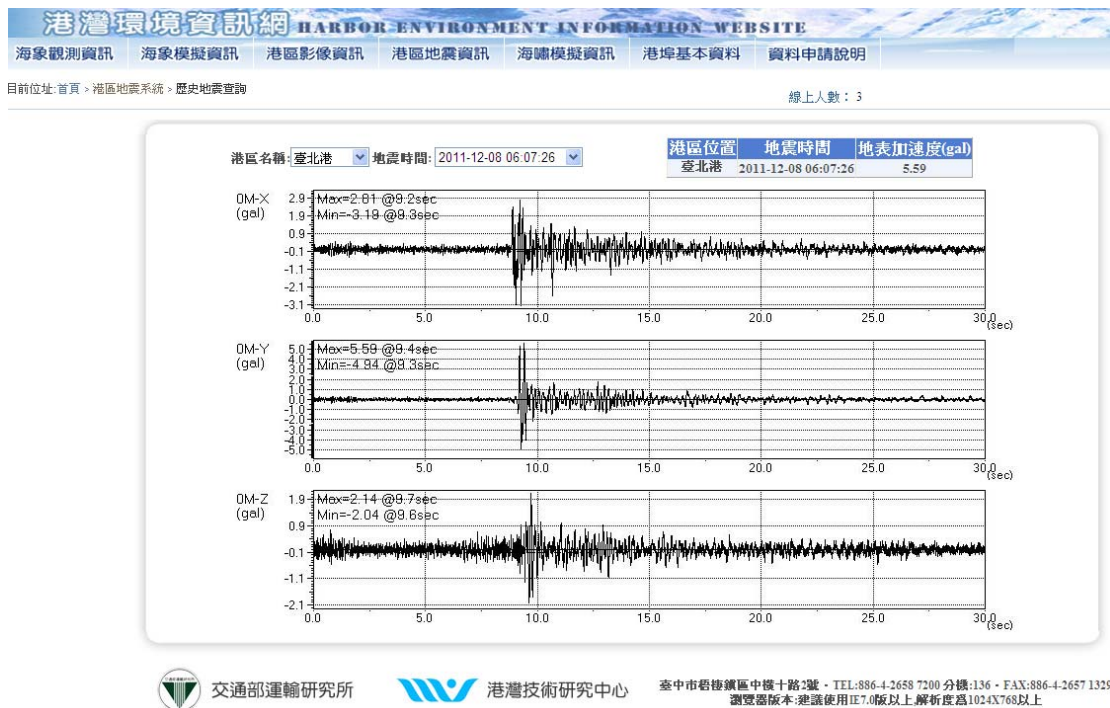


圖 7.52 港區歷史地震查詢圖-臺北港

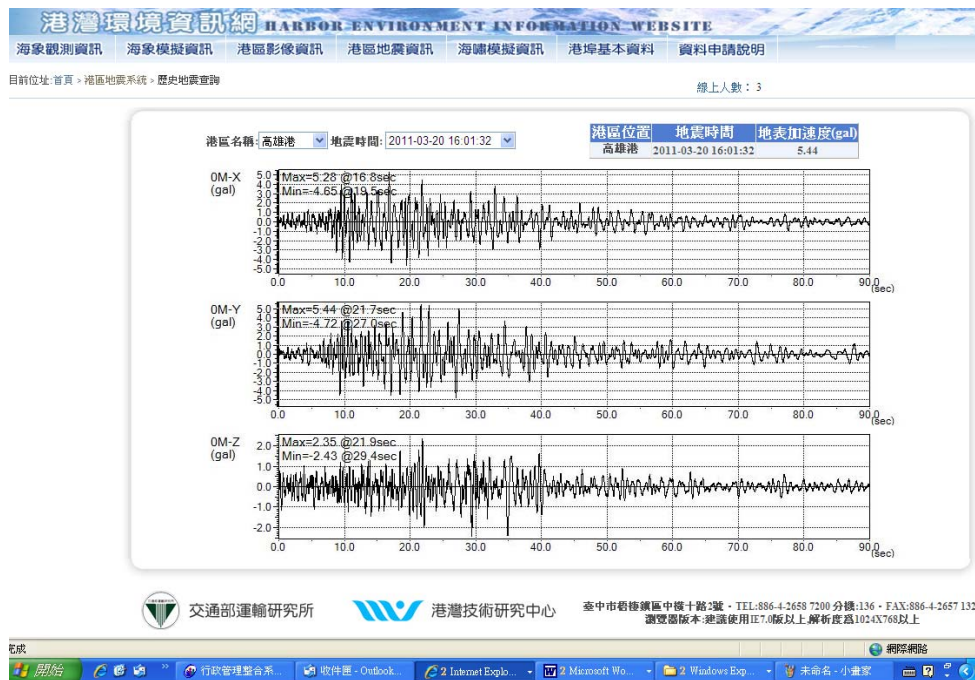


圖 7.53 港區歷史地震查詢圖-高雄港

7.7 港區微地動試驗

本節採 Nakamura 在 1989 年提出單站頻譜比法之經驗式，分別於臺北港及高雄港區進行微地動試驗，利用試驗所得資料，即以水平向與垂直向之震幅放大頻譜比(H/V amplification spectrum ratio)，分析出淺層沖積土層之共振頻率。

7.7.1 臺北港區微地動試驗與共振主頻

於臺北港區以 (Guralp CMG-6TD 型數位寬頻地震儀，如圖 7.54) 進行微地動試驗，利用晚間無重型機械運作時施作以避免人為震動之影響，每一測點施測 15 分鐘。測線圍繞臺北港全區周邊，以 200 公尺設一個測站，總計量測 22 站，測站資料如表 7-8 所示，各站位置如圖 7.55 所示。

經量測結果，臺北港區主頻除了一個測站為 2.69Hz 外，其餘大約介於 0.98~1.81Hz，港區共振主頻等值分佈圖如圖 7.56。



圖 7.54 微地動儀現地試驗圖

表 7-8 臺北港區測站資料

點號	經度	緯度	高程	誤差	第一主頻	放大倍率	第二主頻	放大倍率
TP01	289184	2782666	5	9	2.42	1.66		
TP02	289283	2782772	4	10	1.71	3.37	15.04	1.42
TP03	289305	2782501	4	8	1.42	0.05		
TP04	289747	2782942	6	7	1.42	0.04		
TP05	289382	2782855	5	8	1.46	3.1	11.13	1.46
TP06	289516	2782746	5	7	1.51	1.91		
TP07	289406	2782747	7	9	1.76	2.71		
TP08	289653	2782882	5	8	1.51	2.77		
TP09	289433	2782632	5	9	1.17	2.79		
TP10	289796	2783185	6	7	1.07	2.93		
TP11	289964	2783314	7	8	1.12	1.82		
TP12	289565	2782675	7	8	1.17	3	3.42	0.71
TP13	289901	2783058	7	9	0.98	1.97		
TP14	289313	2782388	6	7	1.73	2.99		
TP15	289397	2782476	5	8	2.69	3.51		
TP16	289470	2782546	5	8	1.56	3.58		
TP17	289433	2782354	4	10	1.81	2.85		
TP18	289532	2782456	6	8	1.61	3.03		
TP19	289477	2782938	4	8	1.42	5.71		
TP20	289974	2783606	7	8	1.07	2.28		
TP21	290092	2783735	7	8	1.46	2.72		
TP22	290369	2783227	3	10	1.42	2.42		

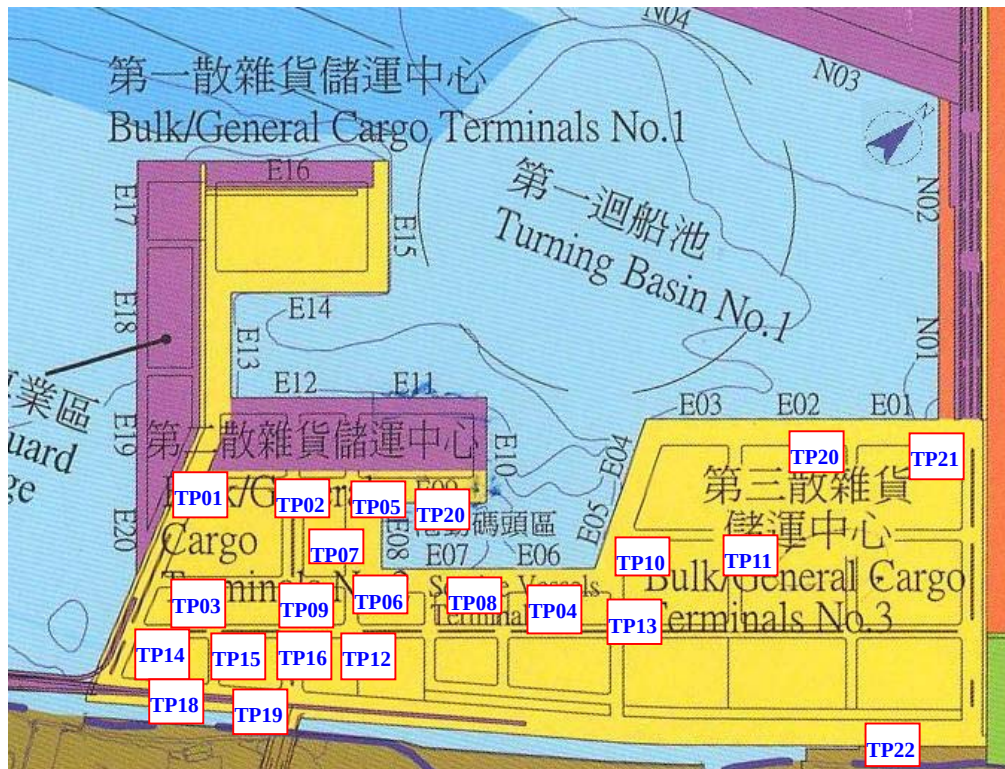


圖 7.55 臺北港微地動測站位置圖

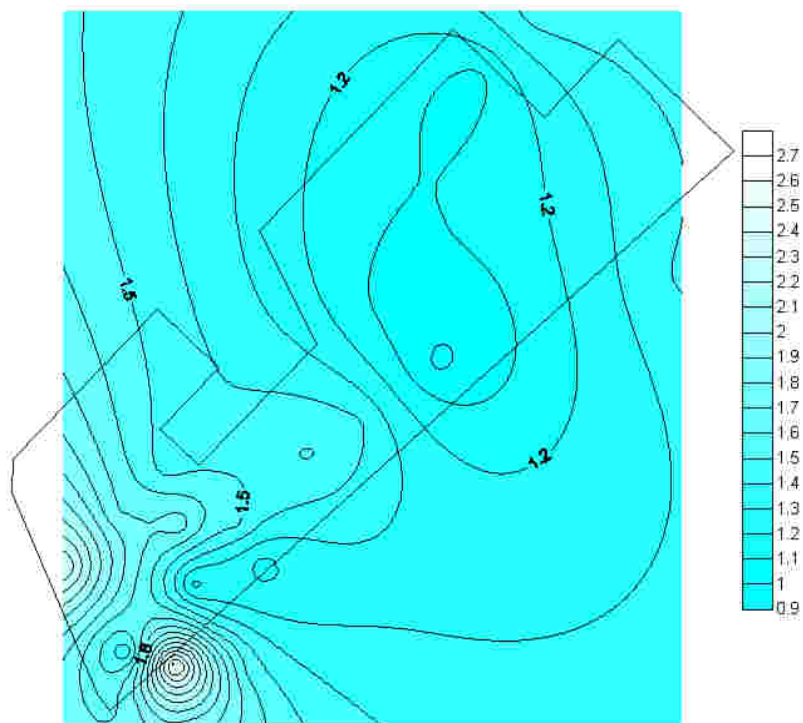


圖 7.56 臺北港區共振主頻等值分佈圖

7.7.2 高雄港區微地動試驗與共振主頻

高雄港區微地動試驗亦應用 Nakamura (1996, 2000)之單站頻譜比法原理，選擇第四貨櫃中心(115~121 號碼頭)進行試驗，以每 200~500 公尺設一個測站，總計量測 9 個站，每一測點施測 15 分鐘。測站資料如表 7-9 所示，各站位置如圖 7.57 所示。

量測結果，高雄港區主頻約介於 0.2~1.2Hz，顯示此區域沖積層較厚，高雄港區第四貨櫃中心共振主頻等值分佈圖，如圖 7.58。

表 7-9 高雄港區測站資料

測站編號	GPS 座標 (TWD97)		第一主頻	放大倍率	第二主頻	放大倍率
	N	E				
B01	178105	2496698	0.85	2.12		B01
B02	178339	2496392	1.19	1.62	4.37	B02
B03	178486	2496285	0.31	3.37	0.41	B03
B04	178536	2496211	0.29	3.89		B04
B05	178643	2496632	0.31	3.16	0.43	B05
B06	178733	2496446	0.22	3.32	0.31	B06
B07	178693	2496003	0.26	3.56	4.37	B07
B08	178999	2495525	0.31	2.95		B08
B09	179207	2495265	0.83	1.79		B09

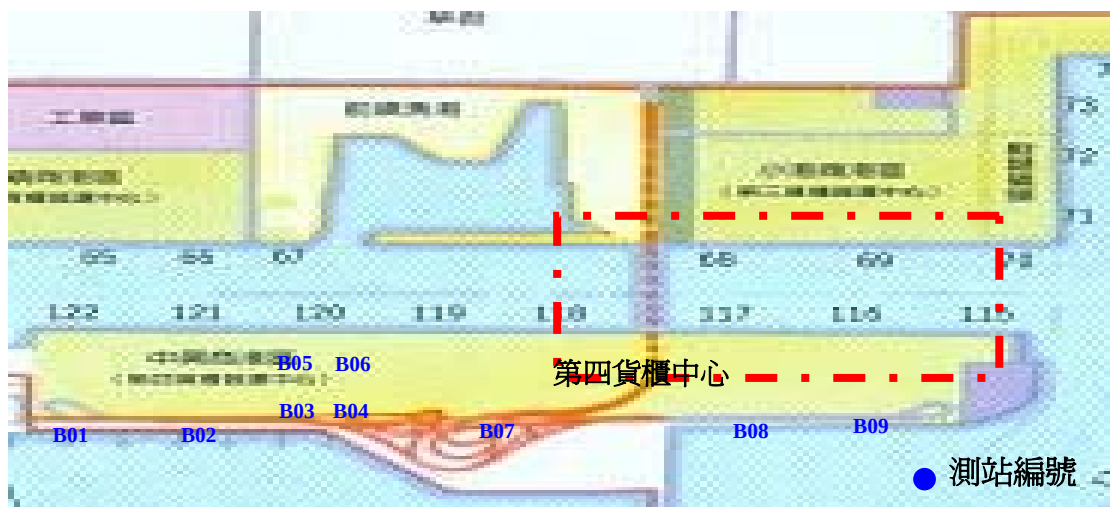


圖 7.57 高雄港第四貨櫃中心各測站分佈位置圖

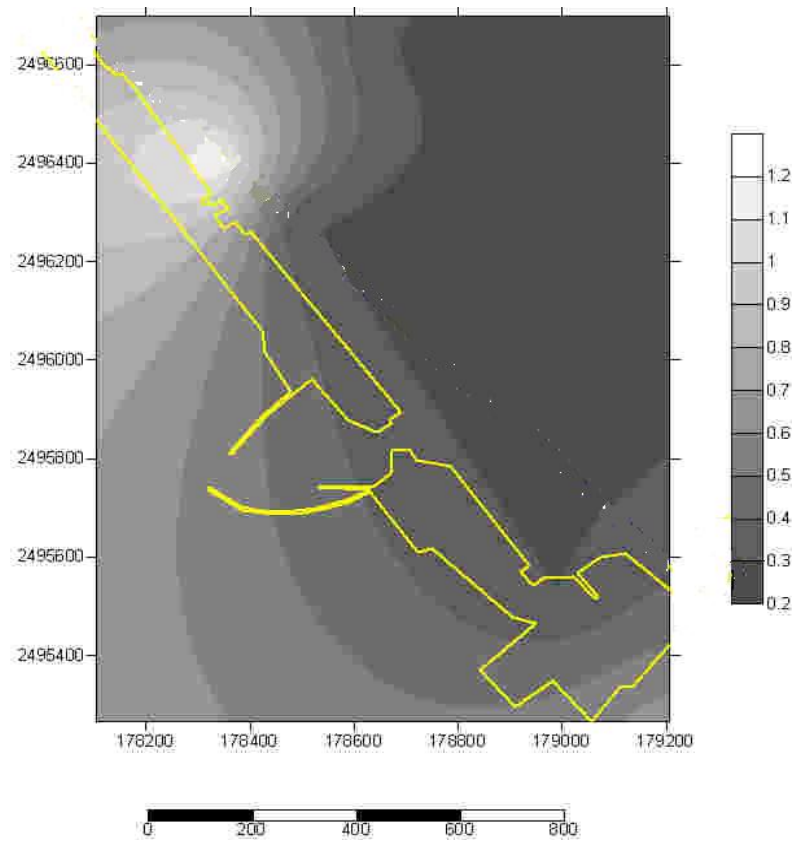


圖 7.58 高雄港區第四貨櫃中心共振主頻等值分佈圖

第八章 港灣地區地層下陷監測分析

臺灣地區由於地下水大量開發引致之地層下陷問題，已是一種普遍現象，而在沿海地區，亦由於養殖業大量開發抽取超額之地下水，導致愈演愈烈之地層下陷，其中以屏東地區累積最大下陷量達 3.00 公尺為最嚴重，雲林、嘉義地區累積最大下陷量約 1.5~2.0 公尺，而彰化濱海地區亦有 2.3 公尺之下陷量，整個西南沿海地區幾乎均有地層下陷現象。由於超抽地下水易造成區域性之地下水位下降，港灣地區雖無超抽地下水，但受到附近沿海地區超抽地下水之影響，其地下水位大多已降到海平面以下，有引發海水入侵之疑，若水位繼續下降，恐會導致土壤鹽化、地層下陷及淹水等問題。尤其貨櫃碼頭之貨櫃裝卸及堆置漸朝自動化設計，碼頭地面少許之差異沉陷，皆易使碼頭自動化之機械設備損壞或喪失使用功能。因此，為維護港區工程及各樣設施之安全，設置地層下陷及地下水壓監測站，進行長期之下陷監測。

本計畫連續於布袋港、臺中港、安平港、大鵬灣等港區，各設置 1 組 200 m 及 300m 深地層下陷及靜態水壓監測站，採手動方式以無線電波感應式層別沉陷儀，定期進行港區地層分層沉陷之長期監測，主要是維護各港區沉陷及水位觀測井之正常監測，平時定期量測各港區之沉陷及水位變化，以探討地下水壓變化對各港區地層下陷之影響。地震後，亦可量測分層地層下陷，分析各土層地震時之沉陷量。

8.1 布袋港監測站

8.1.1 布袋港地下水位分析

本中心於布袋港區第二期海埔地之西北角隅設置一組 200m 深之下陷與水壓監測井，另選擇於布袋商港近南堤之砂石碼頭區，亦設置一組 300m 深之下陷與水壓監測井，其位置如圖 8.1 所示。

1. 200m

200 公尺監測井共埋設 7 支水壓計，其深度分別為 34 m、44 m、68 m、105 m、131 m、143 m、178 m，自 86 年 7 月 22 日起至 100 年 10 月為自動量測系統資料，量測期間曾因儀器故障而資料中斷，茲將分層地下水壓 (t/m^2) 正規化為分層地下水位 (m)，以利比較，如圖 8.2a 及 8.2b 所示，發生於民國 99 年 3 月 4 日 8 時 18 分的甲仙強烈地震，布袋港 200m 水壓自動監測站於 3 月 4 日中午 12 時亦成功的記錄到超額之孔隙水壓資料如圖 8.2b。由於其中 34 m、105 m、143 m、178 m 之水壓計為開放式，故採手動量測，手動量測自 86 年 4 月至 100 年 10 月止，每月定期量測一次，自 94 年 1 月起因人力有限，故每 2 個月量測一次，99 年 1 月起，每 3 個月量測一次，資料不足的部份以內插法補充，量測結果如圖 8.3 所示。

由圖 8.2 顯示，105 m 處之水位變化極大，最高水位-16.6 m，最低水位-27.6m，91 年及 93 年降雨量較少時，水位明顯降低。131 m 處之水位變化亦很大，最高水位-17 m，最低水位可能為-24 m，其水壓大小及變化與 105 m 處屬同一含水層，143 m 及 178 m 水位大小及變化亦很相當，亦屬同一含水層，其最高水位為-17.8 m，最低水位為-26 m，其變化與 105m、131 m 處相似。

綜合各地層之地下水位資料，如圖 8.2 及圖 8.3 示，布袋港水層約可分為 4 個層次，34 m 水位為第 1 含水層之水位，44 m、68 m 水位為第 2 含水位，105 m 及 131 m 水位為第 3 含水位，143 m、178 m 水位為第 4 含水位。由水位變化現象顯示，第 1、2 層水位變化較小，較無超抽地下水現象，第 3、4 層地下水位低且變化極大，超抽地下水現象明顯，而且以旱季時，水位相對較低，表降雨量減少時，超抽地下水更為嚴重。

2. 300m

於 90 年度選擇位於沉陷監測井旁之適當位置安裝兩孔深層水壓監測井，分別為 100 公尺及 300 公尺，每孔埋設四支水壓計，其深度為 35m、50m、85m、103m、150m、200m、250m、303m 共八支 (如

圖 8.4)，並自 90 年 9 月起進行定期量測，如圖 8.4 顯示，35 及 50m 之水位介於-2.4~-3.5m 之間，屬淺層水位，85 及 103m 為較深層之水位介於-15~-24m 之間且屬同一含水層，其中以 91 年 5 月及 93 年 6 月之水位分別降至-22m 及-24m 較明顯變化，150m 及 200m 之水位介於-19.2~-23.3m 之間亦屬同一含水層，250m 深層之水位介於-21~27m 之間，而 303m 之水位又屬另一含水層，其水位介於-22~-25m 之間變化。

8.1.2 布袋港分層地層下陷分析

1. 200m

於布袋港區第二期海埔地西北角隅之位置，設立 200 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 8、16、30、41、56、66、76、85、100、110、120、131、140、157、170、181、190、200 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 18 個磁環，每個月之中旬定期以無線電波監測儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，資料值由銹鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 8.5 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖顯示，從 86 年 2 月至 100 年 10 月之 14 年 8 個月期間，布袋港地表下 8 m 至 200 m 間之沉陷總量為 59.1 公分，而其中 140~200 m 之沉陷量 28.7 公分，佔總沉陷量之 48% 以上，由此資料顯示，布袋港之沉陷屬於深層沉陷，且較 200 m 更深之處仍可能有沉陷發生，因此布袋港之總沉陷量應比監測所量測之壓縮總量還大。

2. 300m

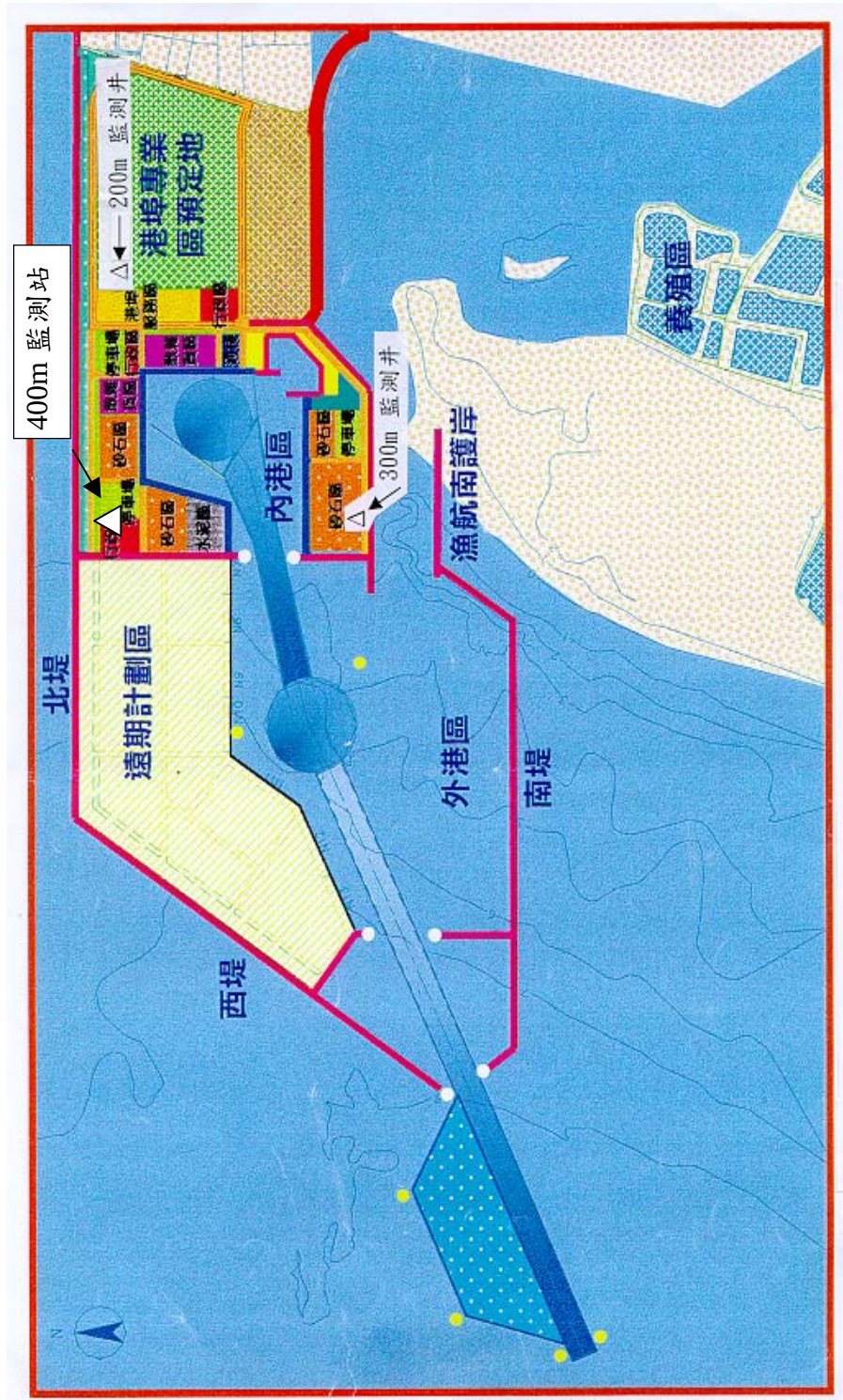
另於商港近南堤之砂石碼頭區，亦完成設置 300 公尺深之地層下陷監測井，分別於深度 3、7、11、21、31、35、51、66、83、94、102、109、112、123、134、142、156、163、178、190、202、212、218、231、241、261、278、285、294、300m 之位置各安裝一個沉陷磁環，共計 30 個(如圖 8.6)。圖 8.6 為至民國 100 年 10 月止，不

同深度地層之個別壓縮量，可發現較深之地層壓縮量較小，壓縮量較大之地層為 66~83m 及 94~102m 之深度，而此地層屬粘土層，因此壓縮量較大。

由圖 8.7a 分層觀測圖顯示，自 89 年 10 月~100 年 10 月止，11 年之沉陷總量約 69.1 公分，分別為 90 年沉陷量約 7.4 公分、91 年沉陷量約 7.1 公分、92 年沉陷量約 11.6 公分、93 年沉陷量約 13.6 公分，近 7 年(94 至 100)總沉陷量約 24.6 公分。監測期間 90 年 8 月時該區進行鑿井，導致 90 年較 91 年沉陷大，92 年 2 月時該區再進行新填土約 2m，導致 92 年及 93 年沉陷增大許多。各分層沉陷量大約可區分為 7~66m、66~102m、102~190m、190~300m 等 4 個層次來分析，66~102m 之累積沉陷量 24.4 公分，約佔總沉陷量之 35%，其中以 102~190m 之沉陷量為 31.7 公分所佔比例最大，約佔總沉陷量之 45%，190~300m 之沉陷量較少為 1.2 公分，約佔總沉陷量之 2%，綜合以上得知，66~190m 深度之累積沉陷量為 56 公分約佔總沉陷量之 81%，與 200m 監測井監測結果比較，總沉陷量較大一些，而且主要沉陷之深度不同，因此需要進行長期之監測，再進一步探討原因。

3. 400m

布袋港 400m 深之水準基站，自民國 92 年設置於商港區的西北角隅，為一個長期之地層下陷自動監測站，設定時間為每 6 小時自動記錄一筆，自 92 年 9 月至 100 年 10 月共 8 年之總累積下陷量約為 24.5 公分，其中 92 年 9 月至 97 年 4 月累積下陷量約 16.5 公分，如圖 8.7b 所示。98 年 7 月至 100 年 10 月之累積下陷量約 8 公分，如圖 8.7c，水準基站之引測，預計於下年度進行水準測量檢測。



8.1 布袋港地層下陷監測井位置圖

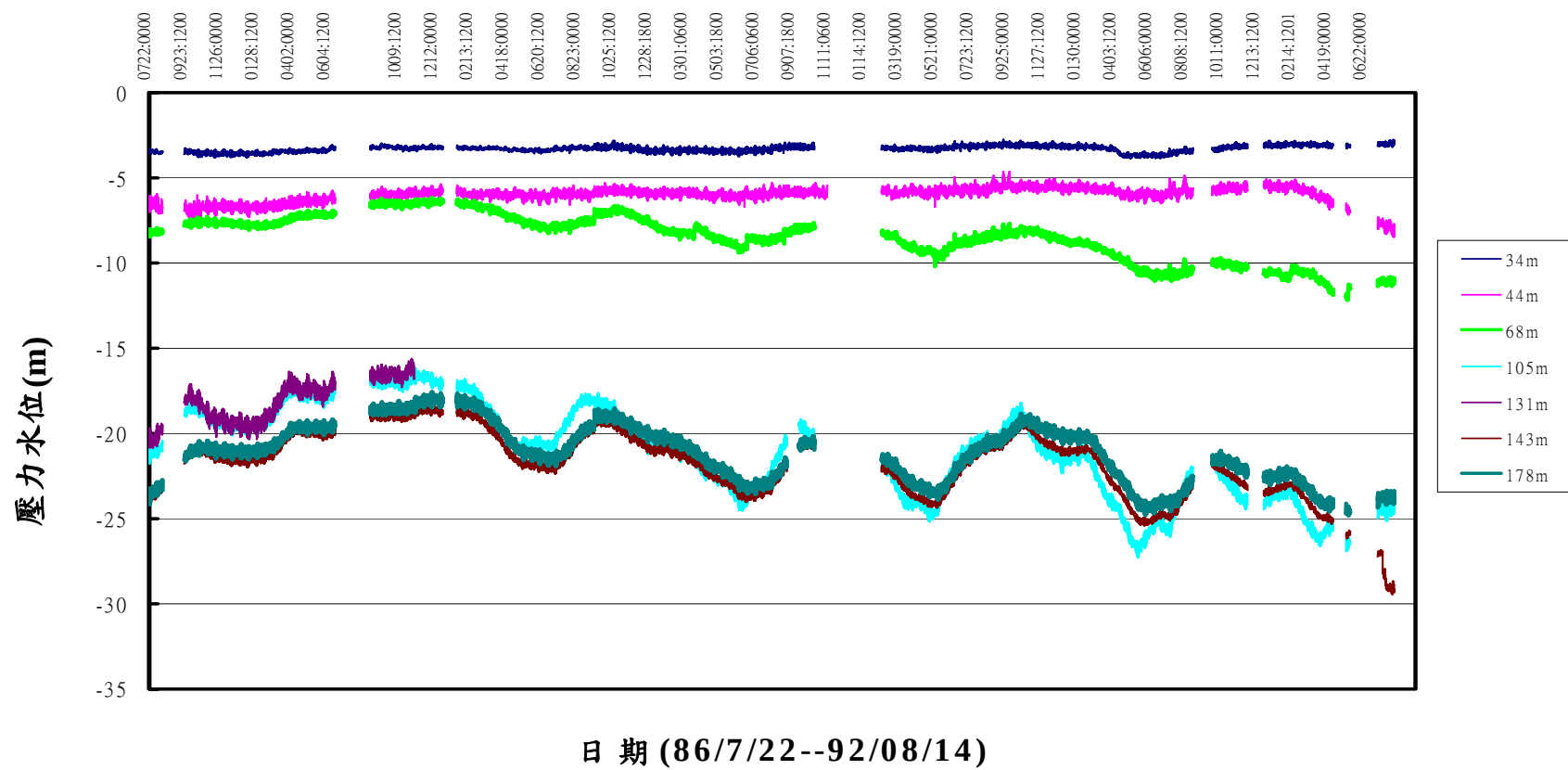


圖 8.2a 布袋港分層水位變化圖(自記式)

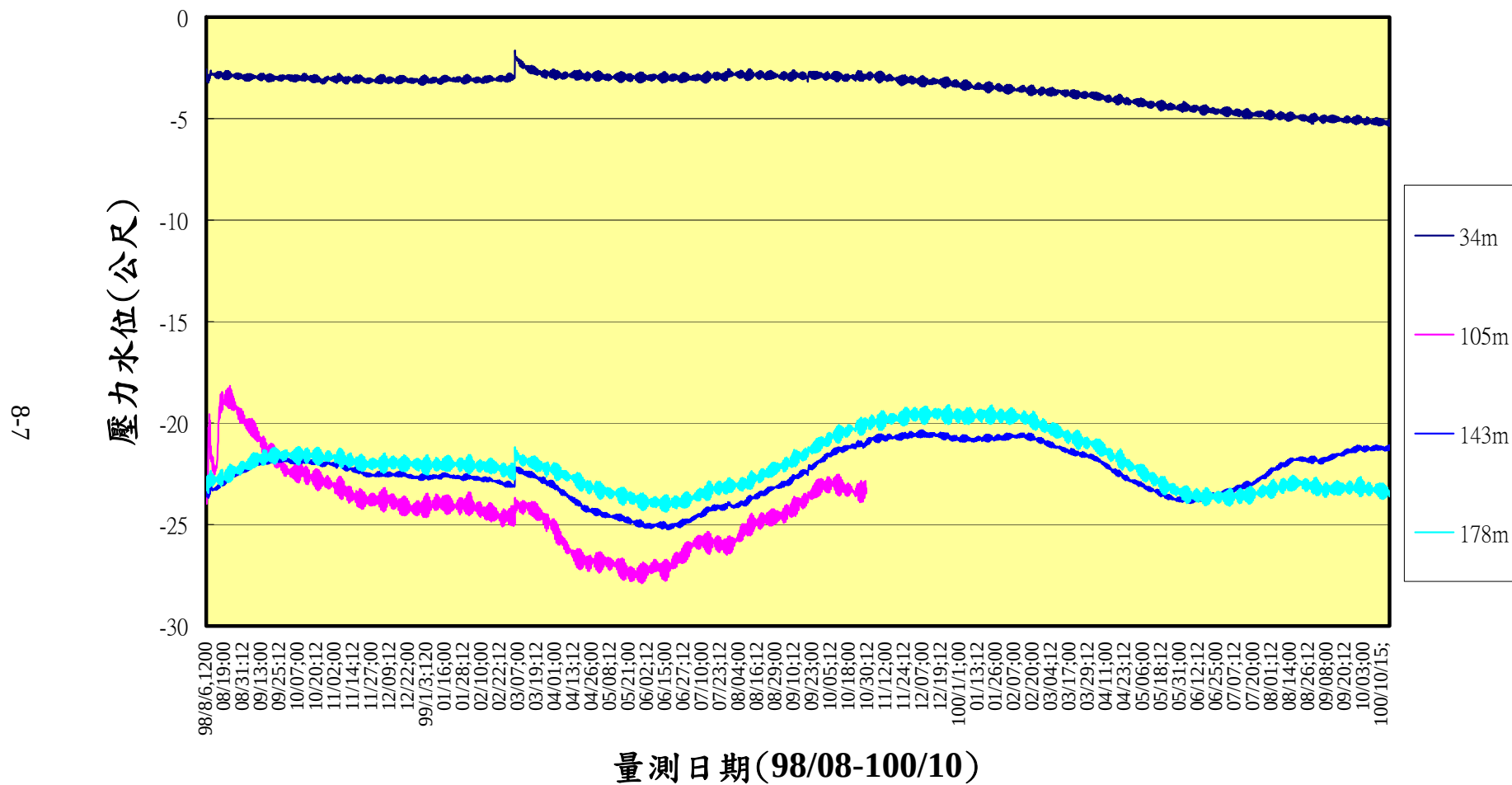


圖 8.2b 布袋港分層水位變化圖(自記式)

布袋港分層水位變化200m(手動量測)

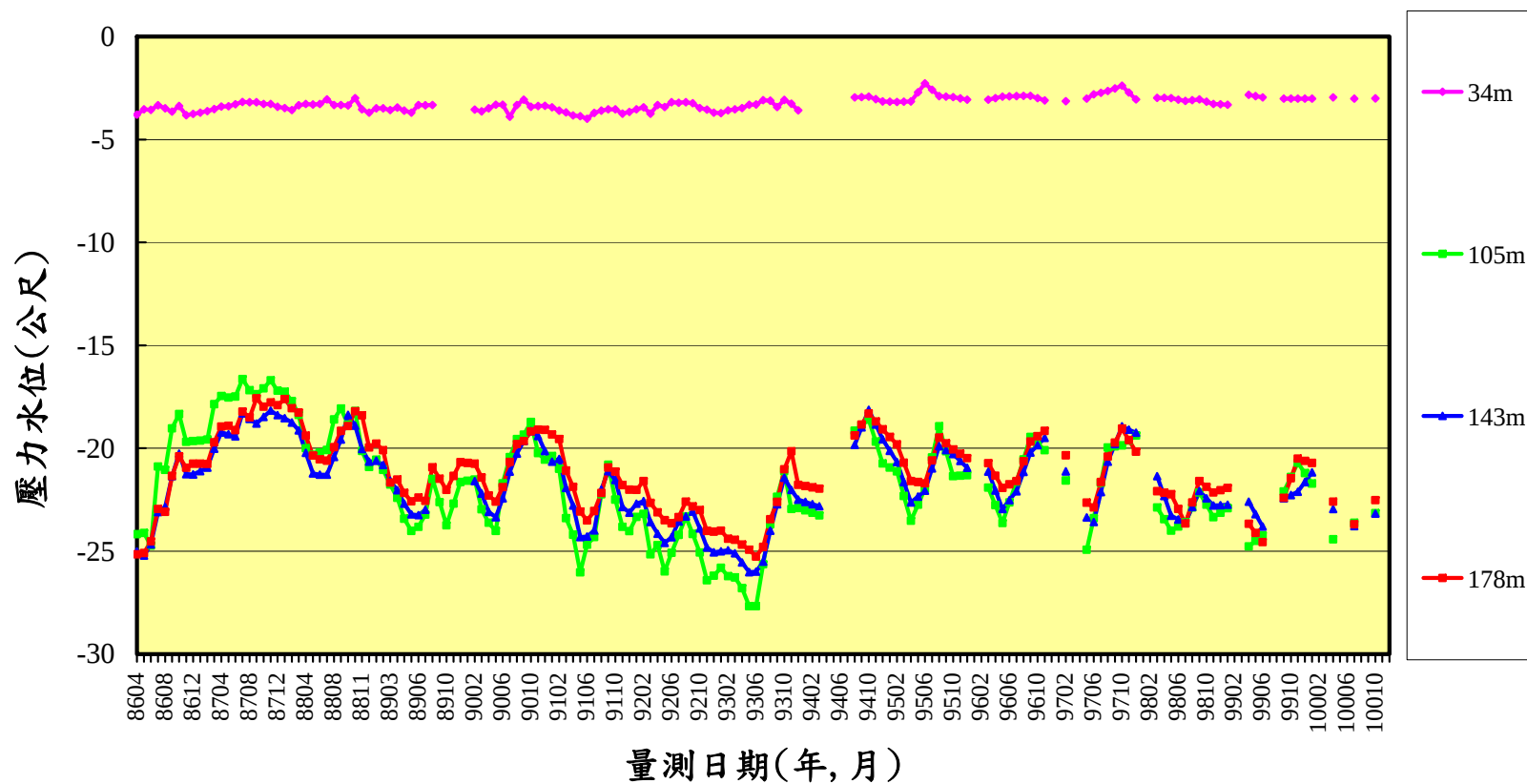


圖 8.3 布袋港分層水位變化圖(手動量測)

布袋港(300m)分層水位變化(手動量測)

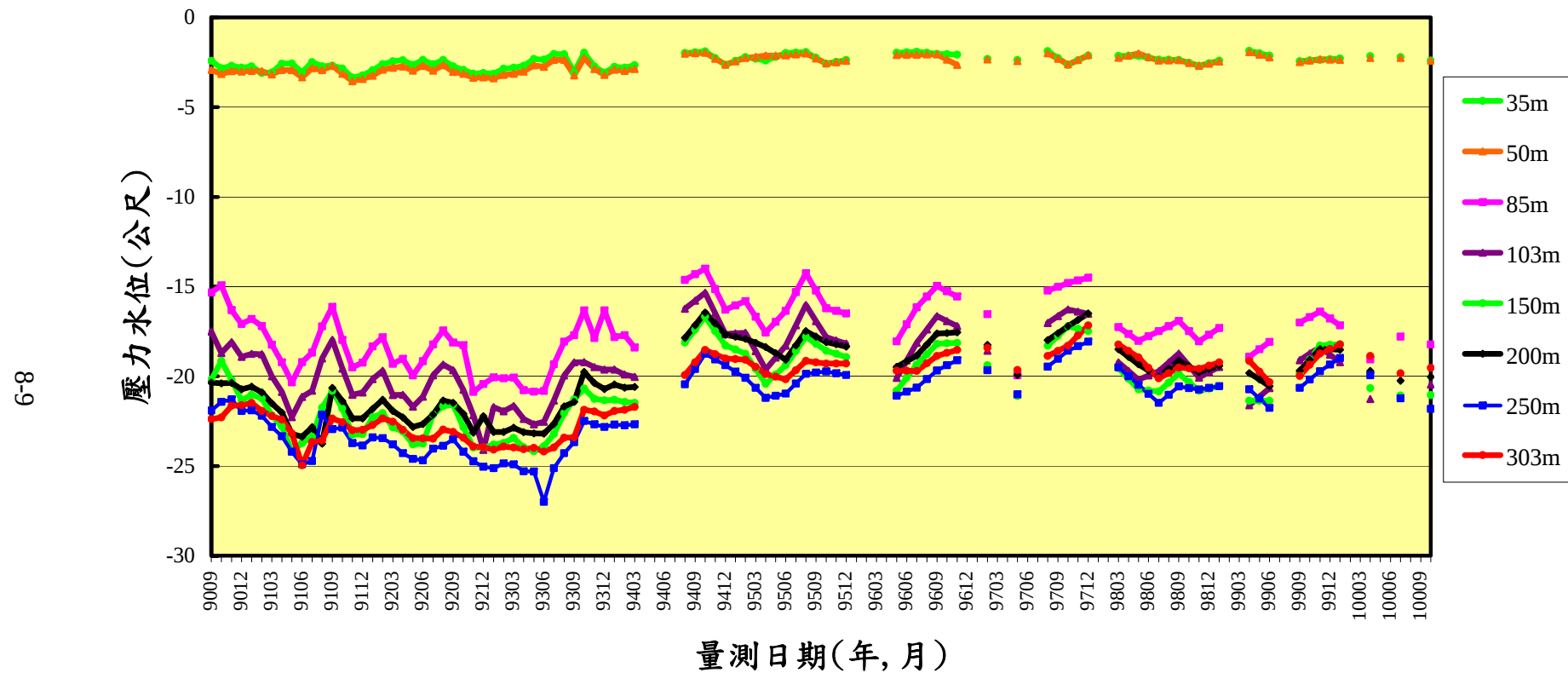
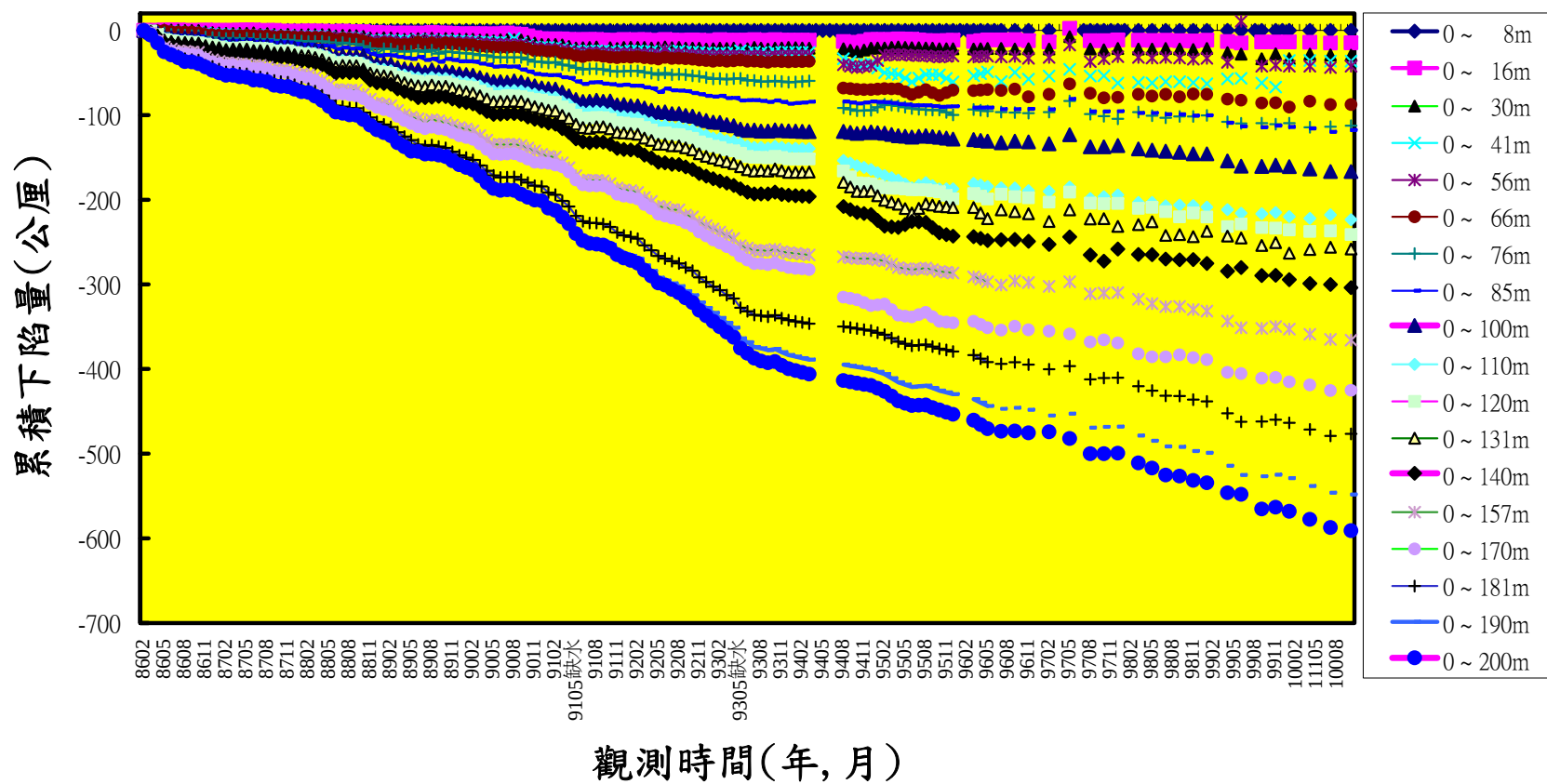


圖 8.4 布袋港分層水位變化(手動量測)

布袋港(200m)地層分層下陷觀測圖



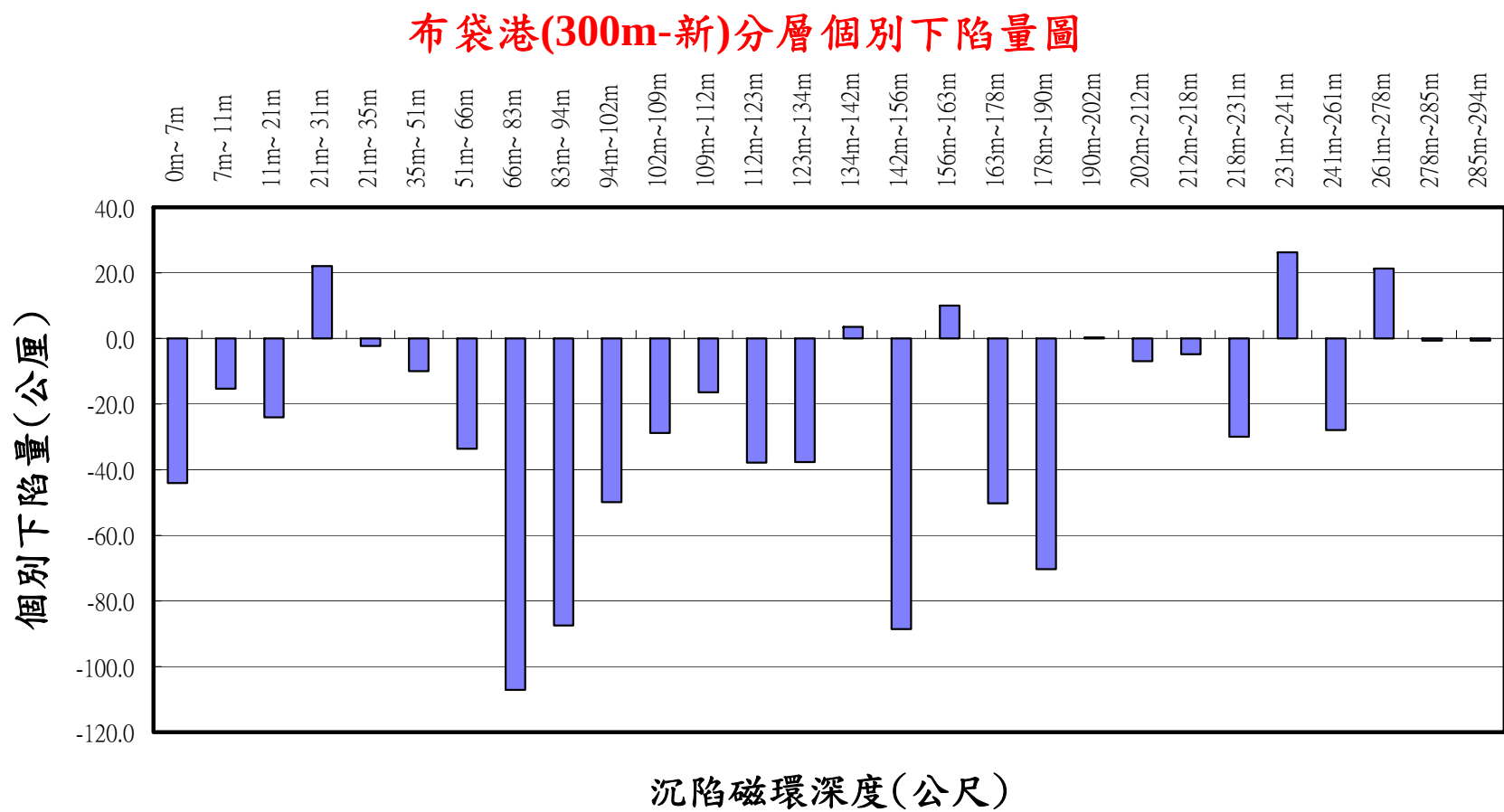
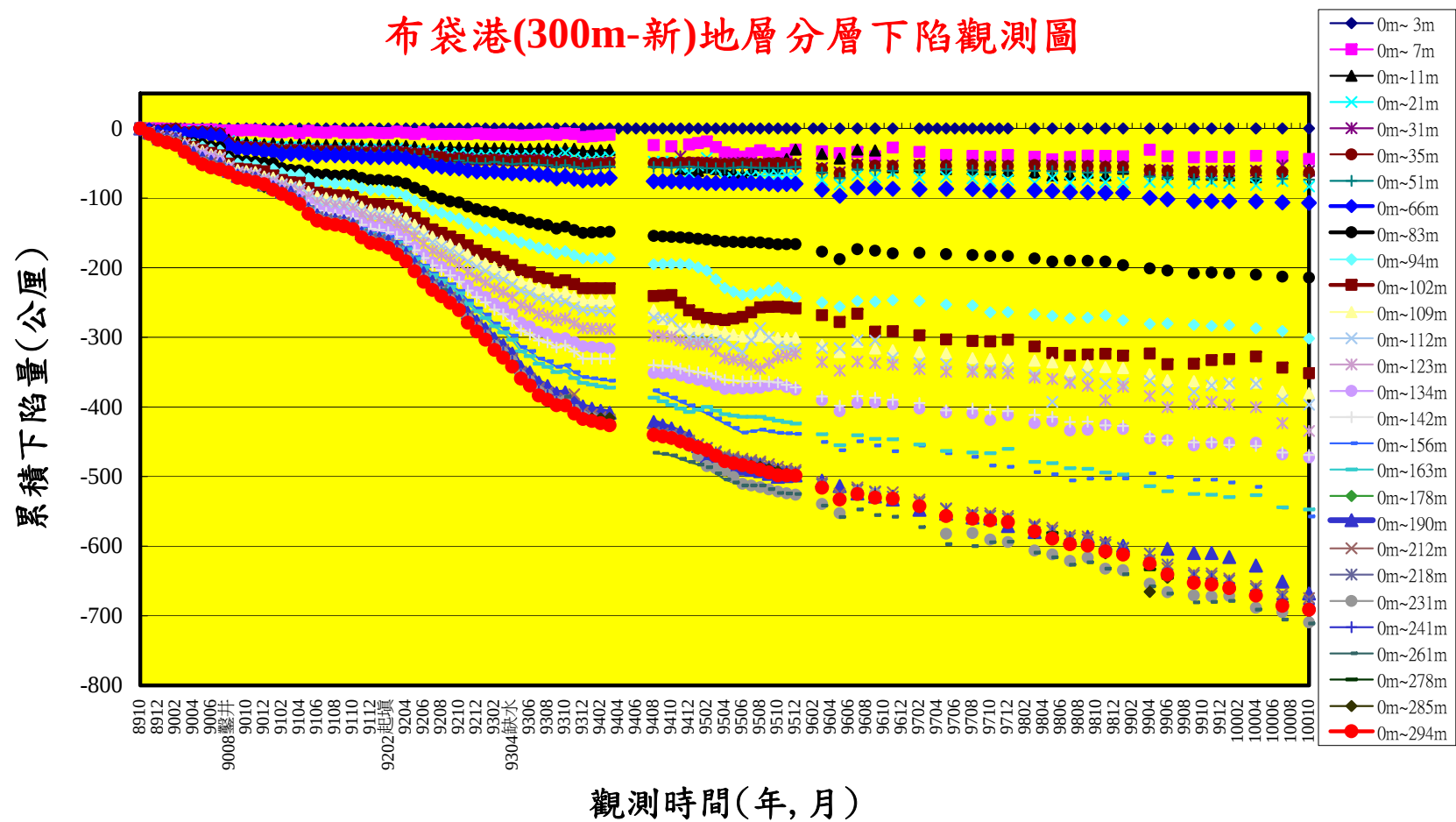


圖 8.6 布袋港(300m)分層個別下陷量圖



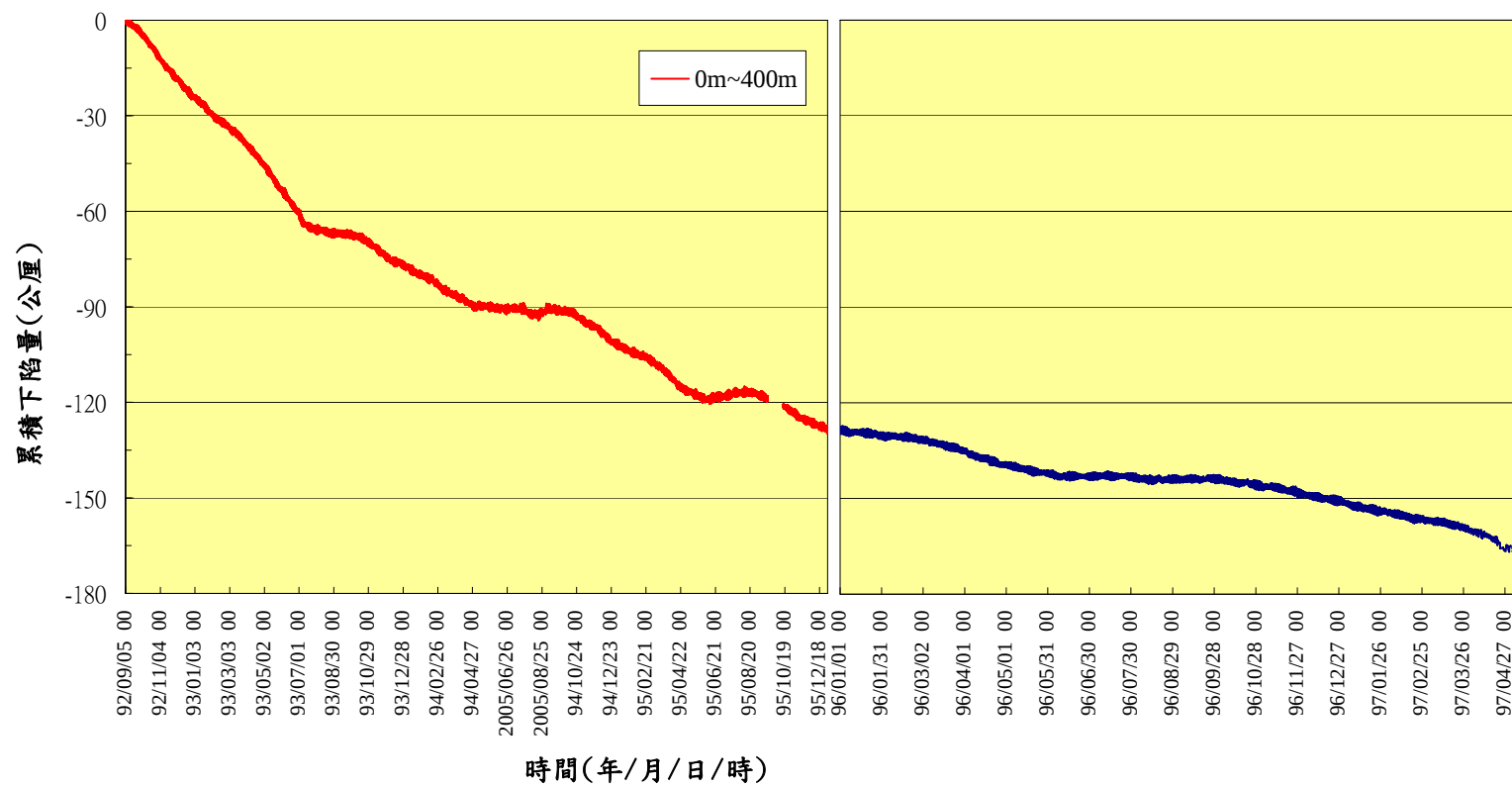


圖 8.7b 布袋港(400m)水準基準累積下陷量圖(92/09~97/05)

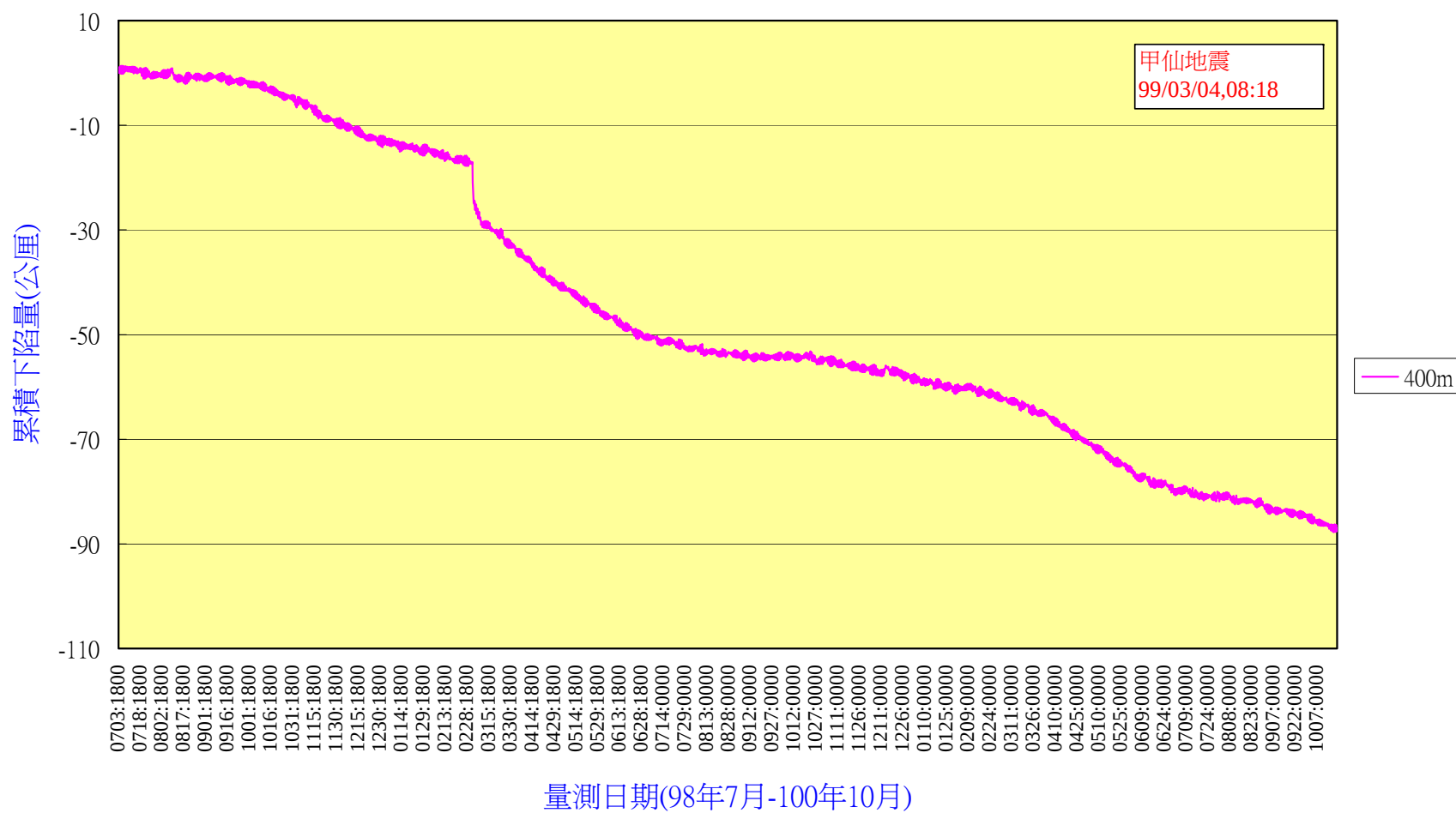


圖 8.7c 布袋港(400m)水準基準累積下陷量圖(98/07/03~100/10/20)

8.2 大鵬灣監測站

8.2.1 地下水位分析

於大鵬灣風景區西南角隅，埋設 202 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支水壓計，其深度分別為 35 m、58 m、105 m、142 m、202 m，以手動及自動兩種方式進行量測，時間自 87 年 3 月 15 日起至 100 年 10 月 20 日止。其中 87 年 9 月 14 日至 10 月 30 日、88 年 7 月 13 日至 9 月 14 日及 89 年 10 月 17 日至 12 月 30 日止，因自動量測儀故障，而缺乏資料。由於水位井為開放式，亦可以手動量測水位，手動量測自 87 年 3 月開始，每月量測一次，99 年 1 月開始，每 3 個月量測一次，其結果如圖 8.8 所示：

8.2.2 分層地層下陷分析

為了探討大鵬灣不同深度之壓縮行為，於水壓觀測站旁之位置，設立 200 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 4、26、31、51、55、62、90、101、103、108、115、119、124、129、138、146、155、161、173、177、188、189 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 22 個磁環，每個月之中旬定期以無線電波監測儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，以分析不同深度地層之壓縮量，資料值由鈰鋼尺上之刻度讀取，其最小刻度為公厘。

圖 8.9 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖 8.9 顯示，從 87 年 3 月至 100 年 10 月止，共 13 年 7 個月期間，大鵬灣地表下 4 m 至 189 m 間之沉陷總量為 118 公厘，而其中地表～51.3 m 之沉陷量為 94.7 公厘，佔總沉陷量之 80% 以上，由此資料顯示，大鵬灣之沉陷屬於淺層沉陷。

大鵬灣分層水位變化(手動量測)

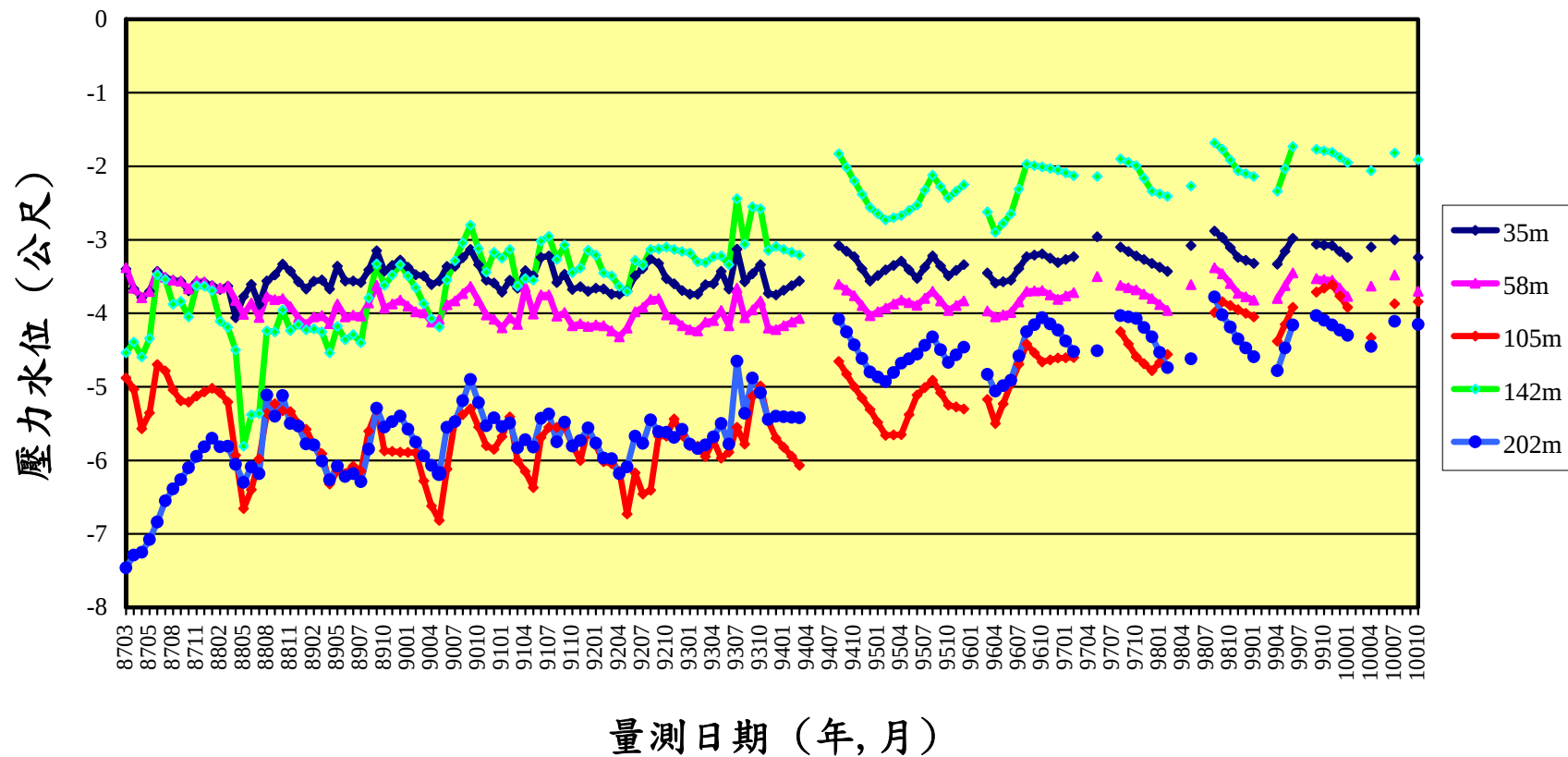


圖 8.8 大鵬灣分層水位變化圖(手動量測)

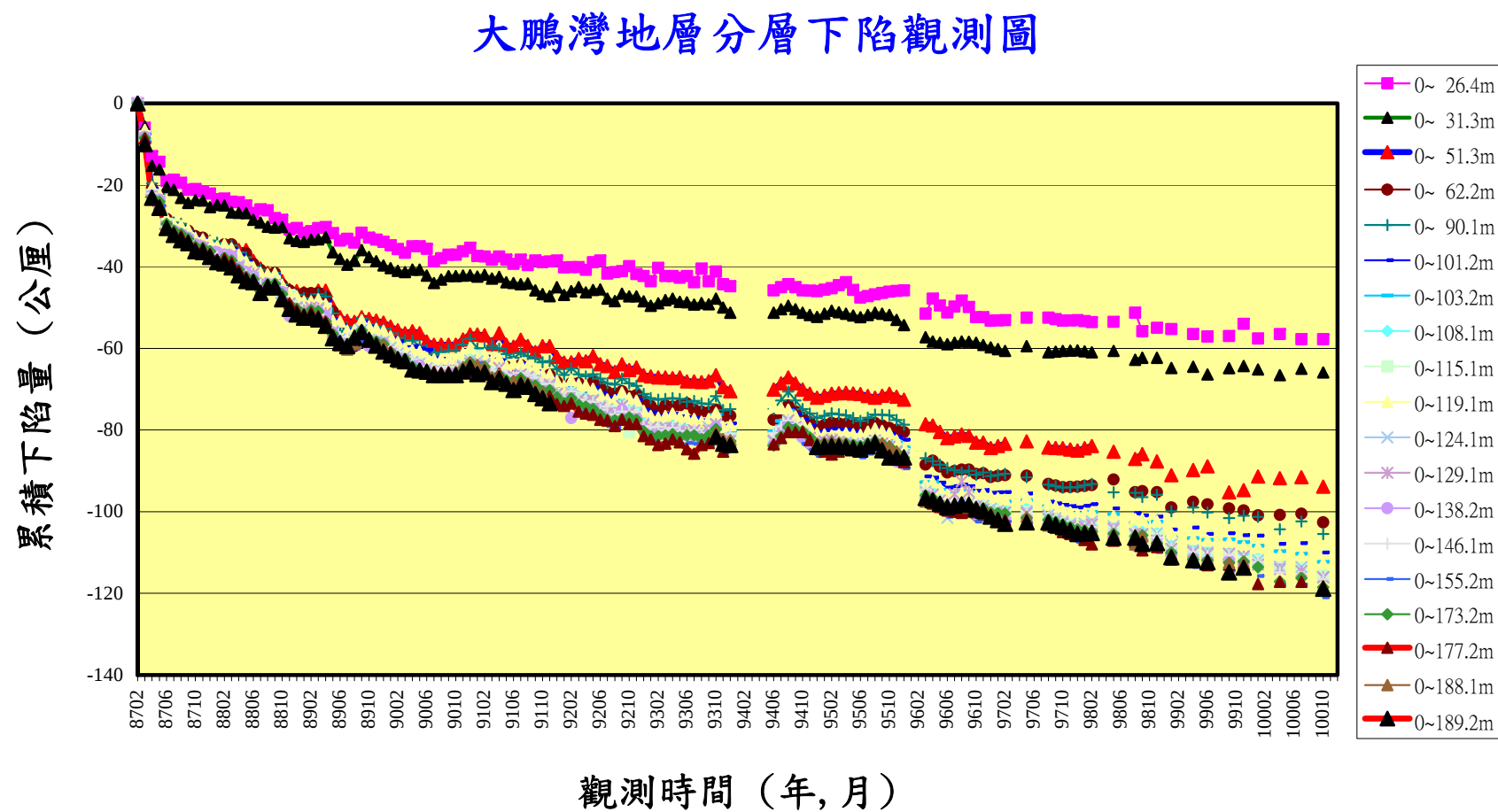


圖 8.9 大鵬灣地層分層下陷觀測圖

8.3 臺中港監測站

8.3.1 地下水位分析

於臺中港之 26 號碼頭綠地區，設置 200 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 29 m、63 m、100 m、145 m、173 m，自動量測資料自 88 年 6 月 29 日起至 91 年 6 月 7 日止，因儀器故障而改以手動量測。手動量測自 88 年 7 月開始，每月量測一次。94 年起，改以每兩個月量測一次，97 年 8 月至 98 年 8 月因水位井卡管而缺記錄，資料記錄截至 100 年 10 月止，其結果如圖 8.10 所示。

因臺中港受到 921 大地震影響，導致部份碼頭有液化現象，本地下水壓監測站亦取得記錄，如 88 年 9 月 21 日 00 時 00 分之各分層水位原約於-3~-5 m，地震後 9 月 21 日 06 時 00 分之各分層水位約為-0.2 m，因地震時間為 9 月 21 日 01 時 47 分，故印證各層水位是因地震後才上升。

8.3.2 分層沉陷分析

於臺中港區第 26 號碼頭綠地之位置，設立 199 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 0、3、10、18、27、31、54、73、90、110、138、157、164、179、181、189、199 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 17 個磁環。自 88 年 6 月開始量測，而 94 年 8 月起因儀器卡管，故累積沉陷量僅能自地表量測至 181m 深，累積總沉陷量至 100 年 10 月止約為 52 公厘，其中自 0m~90 m 深之沉陷量約 41 公厘，佔總沉陷量 80% 以上，其間以 88 年 9 月至 10 月，因地震產生之總沉陷量 32 公厘最多，而 88 年 10 月至 98 年 11 月止，總沉陷量為 20 公厘，如圖 8.11 所示。

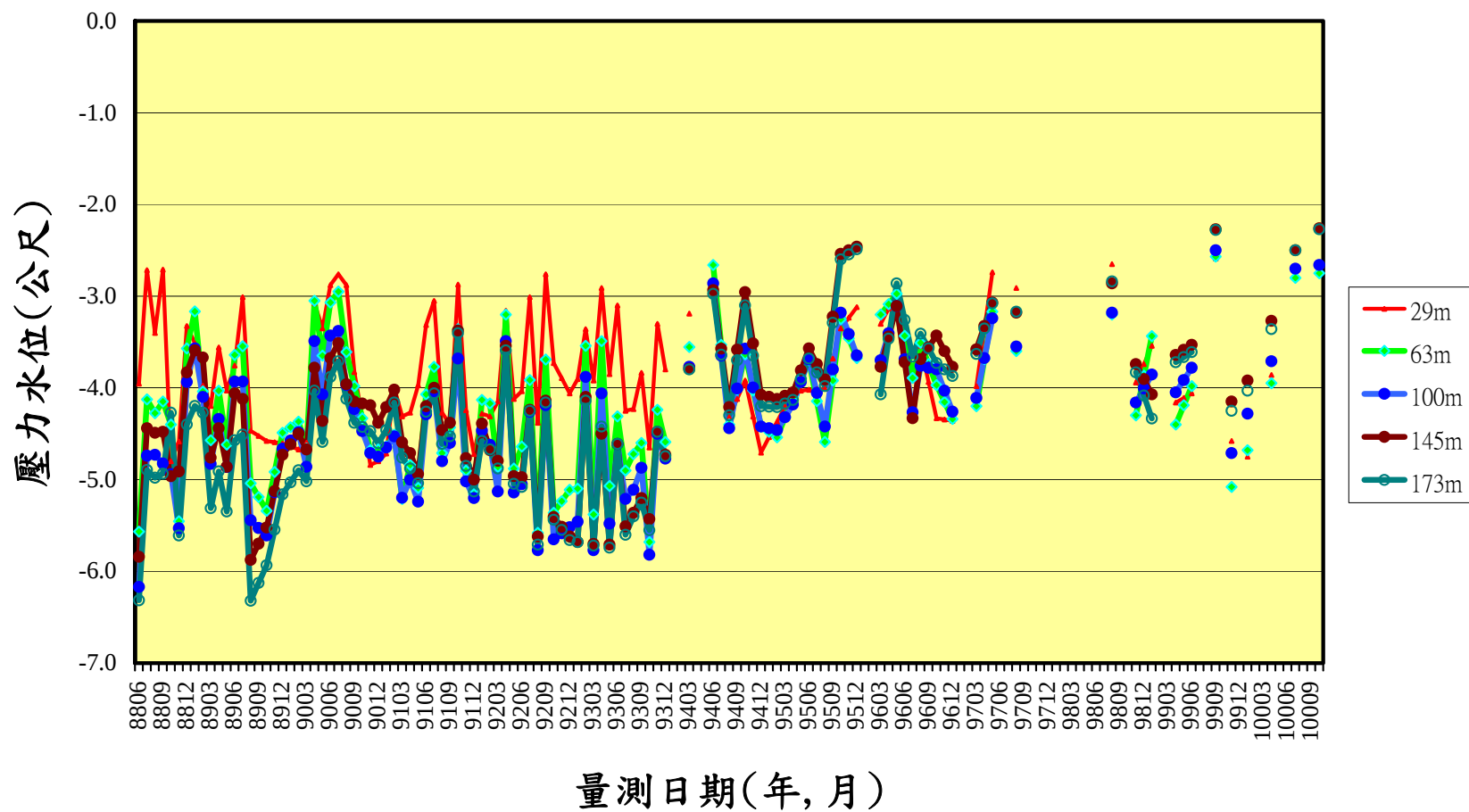
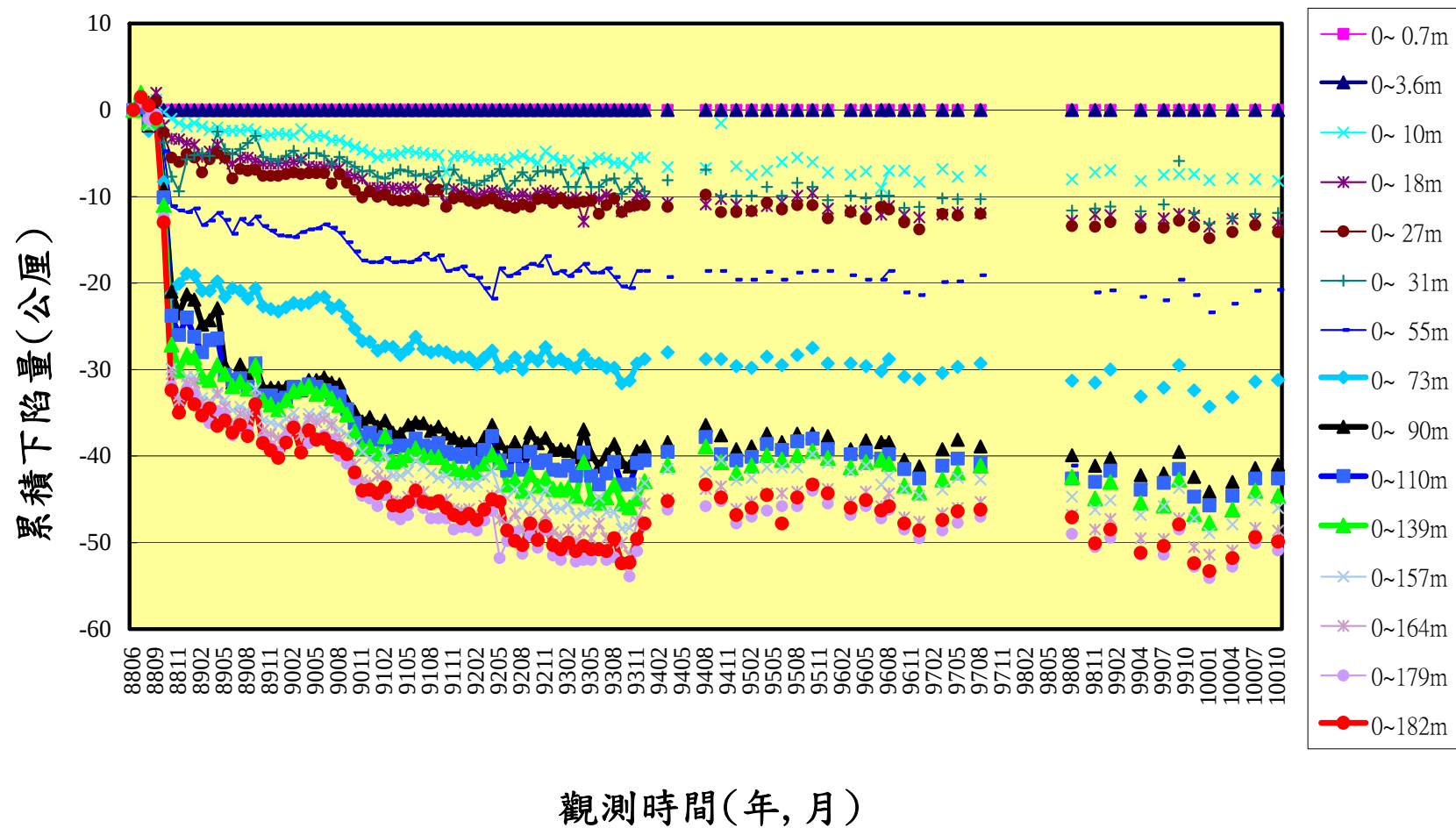


圖 8.10 臺中港分層水位變化圖(手動量測)



8.4 安平港監測站

8.4.1 地下水位分析

於安平港之 18-19 號碼頭綠地區，埋設 200 公尺深之分層水壓觀測站，共埋設 5 支開放式水壓計，其深度分別為 40 m、75 m、105 m、145m、182 m，自 88 年 7 月開始量測，每月量測一次，99 年 1 月起，每 3 個月量測一次，其結果如圖 8.12 所示。

由圖 8.12 顯示，各地層之地下水位，40 m 及 75 m 為第 1 含水層之水位，105 m 為第 2 含水層，145m 為第 3 含水層，182 m 為第 4 含水層，由水位變化顯示，第 1 含水層之 40 m 及 75 m 粉土層之水位變化較大，超抽地下水現象明顯，第 2 及 3 含水層 105 m、145m 土層之水位變化較小，第 4 層之 182 m 之水位變化亦很大，唯水位不降反升，顯示此層水位有回補現象。整體來說，安平港附近地區近 4 年來 (96 至 100 年) 應沒有受到超抽地下水影響，故地下水位呈現上升現象。

8.4.2 分層地層沉陷分析

於安平港之 18-19 號碼頭綠帶地區，設立 250 m 深之分層地層下陷監測井，分別在深度 0.6、4、10、20、30、40、52、55、79、94、110、133、149、174、180、200、210、220、230、239、248、249 m 之位置安裝一個沉陷磁環，共 22 個磁環，每個月中旬定期以無線電波儀量測各沉陷磁環之相對移動變化量，求得不同深度土層之壓縮量，銕鋼尺讀數之最小刻度為公厘。

圖 8.13 為不同時期不同深度之感應磁環相對於深度 200 公尺感應磁環之累積曲線比較圖，由圖顯示，從 88 年 7 月至 94 年 3 月之 5 年 8 個月期間，安平 18-19 號碼頭區地表下 0 m~200 m 間之沉陷總量為 73 公厘，而其中 0~56 m 之沉陷量為 67 公厘，佔總沉陷量之 88% 以上，由資料顯示，安平港 18-19 號碼頭區之沉陷屬於淺層沉陷，自 94 年 3 月起因儀器故障故量測資料中斷。

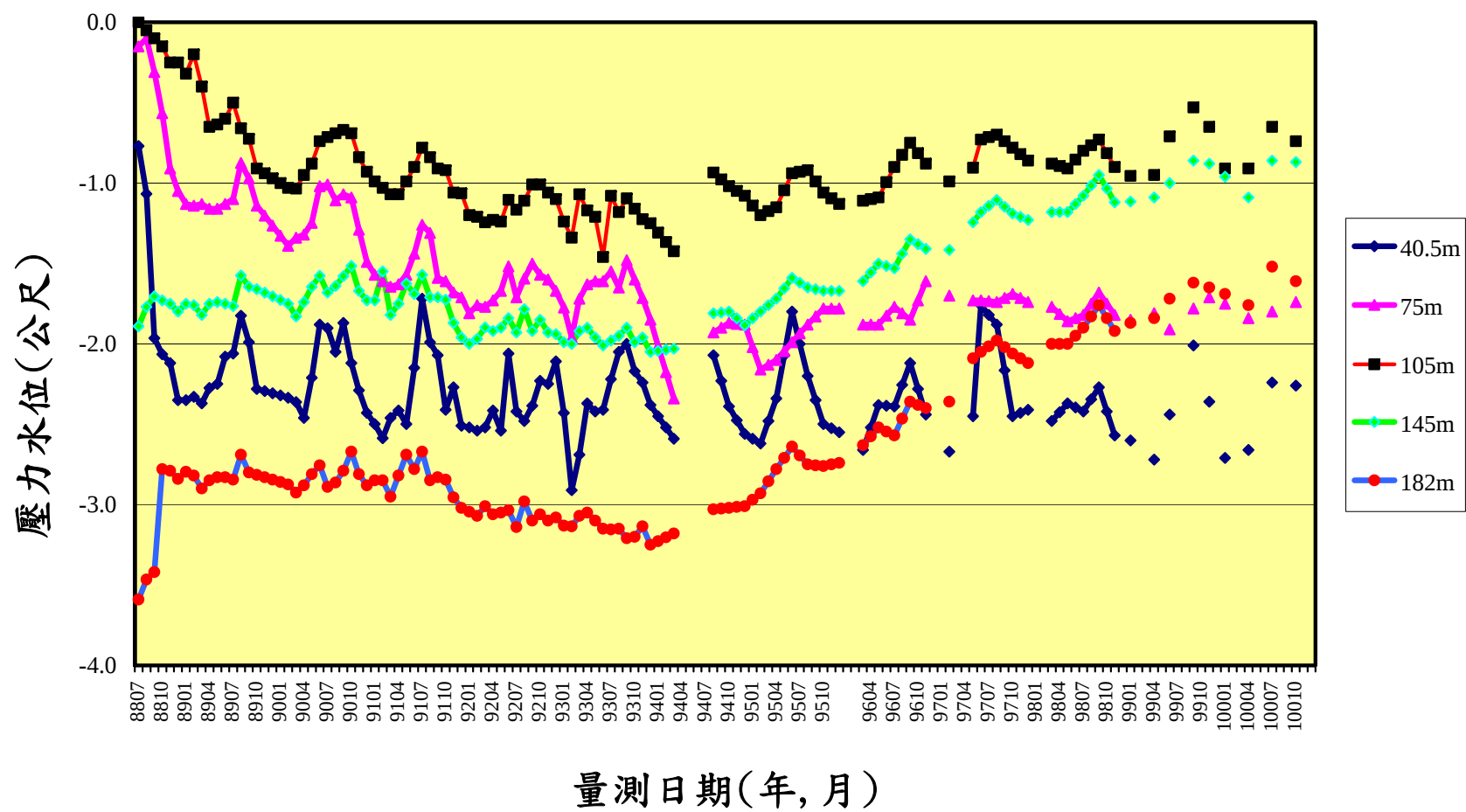


圖 8.12 安平港分層水位變化圖(手動量測)

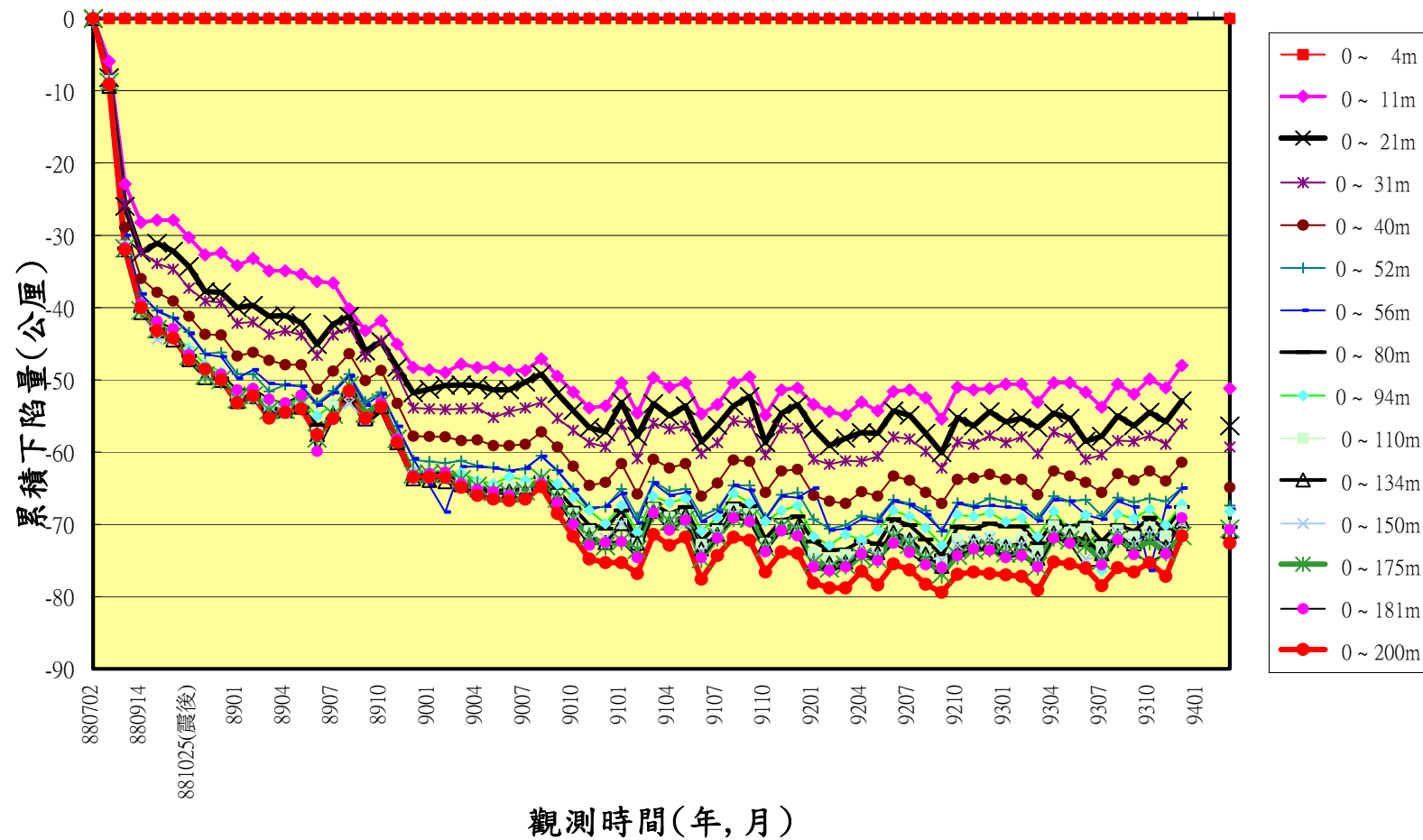


圖 8.13 安平港分層累積下陷量

第九章 港埠規劃資料更新建置及查詢操作

本研究已建置的各港區港埠規劃資料及查詢展示模組，係架構在本所港研中心所開發的「港區工程基本資料查詢系統」之下，該系統的查詢界面設計成下拉式選單方式。主選單共有六大項，分別為(1)港埠規劃(2)鑽探資料(3)碼頭設計及調查資料(4)堤防設計資料(5)地震監測(6)海氣象現地調查等。由 MapInfo 進入此查詢系統，點選進入所欲查詢的港區，該港區地圖即展示在螢幕上，且原有的 MapInfo 內定選單也同時全部更換成新設計的查詢選單。本研究年度內更新國內四大國際商港規劃資料，相關系統操作及資料查詢說明如下：

9.1 系統操作程序

本系統之查詢設計，係以下拉式功能表配合物件選項的操作方式為主。使用者可在螢幕上選取所欲查詢的物件，再利用下拉式功能表來展示各項文件資料或繪製相關成果。系統內可查詢到基隆、臺北、臺中、高雄、花蓮、蘇澳等港區之碼頭、堤防、地質及相關文件資料，操作程序如下所示：

1. 在視窗作業環境下，執行 MapInfo 系統，進入該系統內。
2. 點選功能表 File\Run MapBasic Program，選擇 d:\harbor-1 內的執行檔 harbor.mbx，按 OK 選鈕，即進入港區工程基本資料查詢系統。
3. 此時螢幕會展繪出臺灣全島地圖，並標示基隆、臺北、臺中、布袋、高雄、花蓮、蘇澳等港區的分佈位置。
4. 利用滑鼠，點選其中任一港區，則螢幕展繪出該港區的向量地圖，地圖以綠色標示陸面區域位置，以水藍色標示海面區域位置。此時可點選「港埠規劃」主選單下之第一選項「港埠設施現況圖」，系統則載入該港區之港埠設施現況分佈圖。或是點選「碼頭設計及調查資料」主選單下之第一選單「顯示碼頭位置圖」，系統則載入該

港區之碼頭位置分佈圖。

5. 利用工具箱內的放大、縮小、平移等工具，可作地圖縮放，以更精細地查詢目標鑽孔位置及鄰近地形。
6. 選單利用不可點取之設定，避免錯誤點選。
7. 本系統提供不可點取之設定，將暫時不需運作的功能與予停用，待關聯圖層開啟後，再將需用功能啟動。例如「港埠規劃」主選單，其下之第一選項「港埠設施現況圖」或第三選項「未來規劃配置圖」等開啟圖層之功能，都預設為可啟動；而第二選項「關閉港埠設施現況圖」或第四選項「關閉未來規劃配置圖」等關閉圖層之功能，預設為不可啟動(選項顏色為灰白)。系統待第一選項被點取後，第二選項即被更換為可啟動(選項顏色由灰白轉為正常)，第三及第四選項也是如此配搭，系統乃以此種設計來避免錯誤點選。
8. 若要查詢另一港區的相關資料，可點選第一主選單「港埠規劃」下的倒數第二選項「選擇港區」，則系統會跳回主畫面顯示港區位置分佈圖。再依循步驟 4 至 8，可繼續查詢所需港區之相關資料。
9. 結束查詢，可在功能表的第一個主選單「港埠規劃」下，拉出最後一個選項「離開系統」，點選後則可停止本程式的執行。

9.2 港埠規劃資料查詢說明

9.2.1 進入查詢系統

1. 按照上一節程式操作程序 1 至 3，使用者可進入查詢系統的主畫面，此時螢幕視窗會展繪出臺灣全島地圖與主要港區的標示位置，如圖 9.1 所示。
2. 將滑鼠遊標移至全島地圖上某一港區之文字標示區內，按滑鼠左鍵，可叫出該港區基本地形圖層，如圖 9.2 所示為基隆港區基本圖層。而原有的 MapInfo 內定選單也同時全部更換成新設計的選單。

圖 9.2 也同時展示新設計的主選單「港埠規劃」功能項下拉查詢模式。

9.2.2 港埠規劃資料查詢

下拉查詢系統的第一主選單「港埠規劃」項，可查詢該港區的港埠現況配置資料及相關該港港埠規劃資料，此選單下相關重要選項之內容及查詢方式如下：

1. 展示港埠設施現況圖：下拉第一主選單「港埠規劃」，其下之第一選項為「港埠設施現況圖」，以滑鼠點選該選項後，螢幕主畫面隨即切換為目前該港區的港埠設施現況配置圖。使用者可查看了解該港區的配置現況，圖 9.3 即為基隆港的港埠設施現況圖。
2. 關閉港埠設施現況圖：港埠設施現況圖顯示後，第二選項「關閉港埠設施現況圖」會立刻由不可點選的無效狀態(文字成灰白色)轉變成可點選的有效狀態(文字成黑色)，此時下拉查詢系統的第一主選單「港埠規劃」，點選此第二選項「關閉港埠設施現況圖」，則可關閉此現況圖而回復到港區基本圖層視窗。
3. 展示未來規劃配置圖：下拉第一主選單「港埠規劃」，其下之第三選項為「未來規劃配置圖」，以滑鼠點選該選項後，螢幕主畫面隨即切換為未來該港區的港埠設施配置圖。使用者可查看了解該港區的未來發展規劃，圖 9.4 即為基隆港的港埠未來規劃配置圖。
4. 關閉未來規劃配置圖：港埠設施現況圖顯示後，第四選項「關閉港埠設施現況圖」會立刻由不可點選的無效狀態(文字成灰白色)轉變成可點選的有效狀態(文字成黑色)，此時下拉查詢系統的第一主選單「港埠規劃」，點選此第四選項「關閉未來規劃配置圖」，則可關閉此現況圖而回復到港區基本圖層視窗。
5. 展示規劃配置對照圖：下拉第一主選單「港埠規劃」，其下之第五選項為「規劃配置對照圖」，以滑鼠點選該選項後，螢幕主畫面隨即切換為該港區的港埠設施現況及未來規劃配置對照圖。使用者可

查看了解該港區的港埠設施現況及未來發展規劃，圖 9.5 即為基隆港的港埠規劃配置對照圖。

6. 關閉規劃配置對照圖：港埠設施現況圖顯示後，第六選項「關閉規劃配置對照圖」會立刻由不可點選的無效狀態(文字成灰白色)轉變成可點選的有效狀態(文字成黑色)，此時下拉查詢系統的第一主選單「港埠規劃」，點選此第六選項「關閉規劃配置對照圖」，則可關閉此現況圖而回復到港區基本圖層視窗。
7. 展示港區遙測影像圖：下拉第一主選單「港埠規劃」，其下之第七選項為「港區遙測影像圖」，以滑鼠點選該選項後，螢幕主畫面隨即顯示出該港區的港區遙測影像圖。使用者可藉此查看整個港區的現況影像，圖 9.6 即為基隆港的港區遙測影像圖。
8. 關閉港區遙測影像圖：港埠設施現況圖顯示後，第八選項「關閉港埠設施現況圖」會立刻由不可點選的無效狀態(文字成灰白色)轉變成可點選的有效狀態(文字成黑色)，此時下拉查詢系統的第一主選單「港埠規劃」，點選此第八選項「關閉港區遙測影像圖」，則可關閉此現況圖而回復到港區基本圖層視窗。
9. 開啟港區飛航導覽動畫影片：下拉第一主選單「港埠規劃」，其下之第九選項為「港區飛航導覽」，以滑鼠點選該選項後，螢幕隨即開啟 windows media player 軟體，撥放港區飛航導覽動畫影片。影片導覽路徑啟始點為該港港口，飛航鏡頭先由港口引入，再沿碼頭岸線前行，港區飛行一週後，由港口導出而結束。此動畫可提供查詢者以三維視角來視察整個港區的全貌。
10. 關閉港區遙測影像圖：以滑鼠點選 windows media player 視窗右上角的關閉鈕，則可關閉瀏覽視窗而停止撥放港區飛航導覽動畫影片，而螢幕即回復到港區基本圖層視窗。
11. 若要查詢另一港區的港埠規劃資料，可點選第一主選單「港埠規劃」下的倒數第二選項「選擇港區」，則系統會跳回主畫面顯示港區位置分佈圖。以滑鼠點選全島港區位置分佈圖上某一港區之文字標

示，進入該港地形圖畫面後，再依循步驟 1 至 10 之操作，即可繼續查詢所需資料。

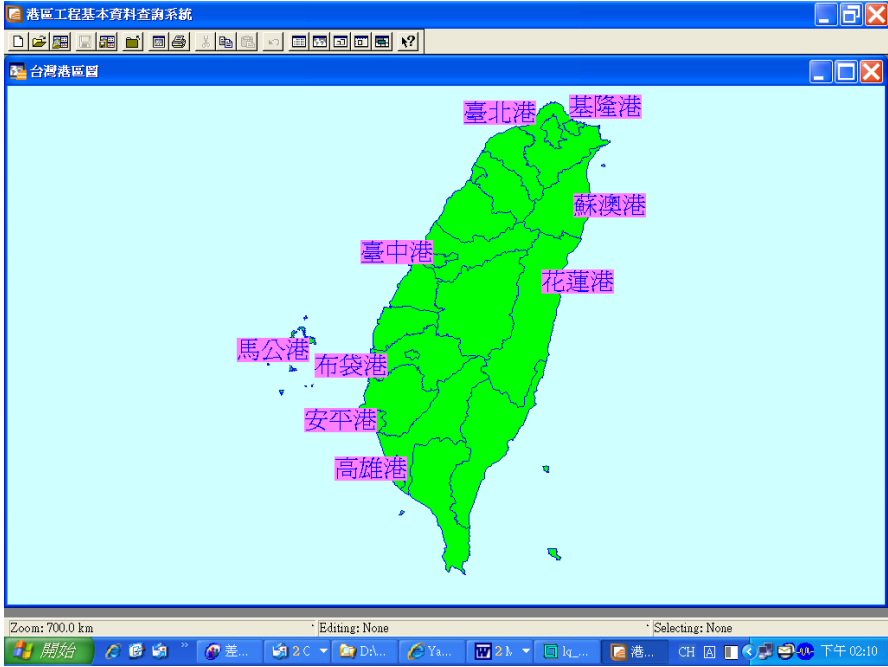


圖 9.1 查詢系統主畫面

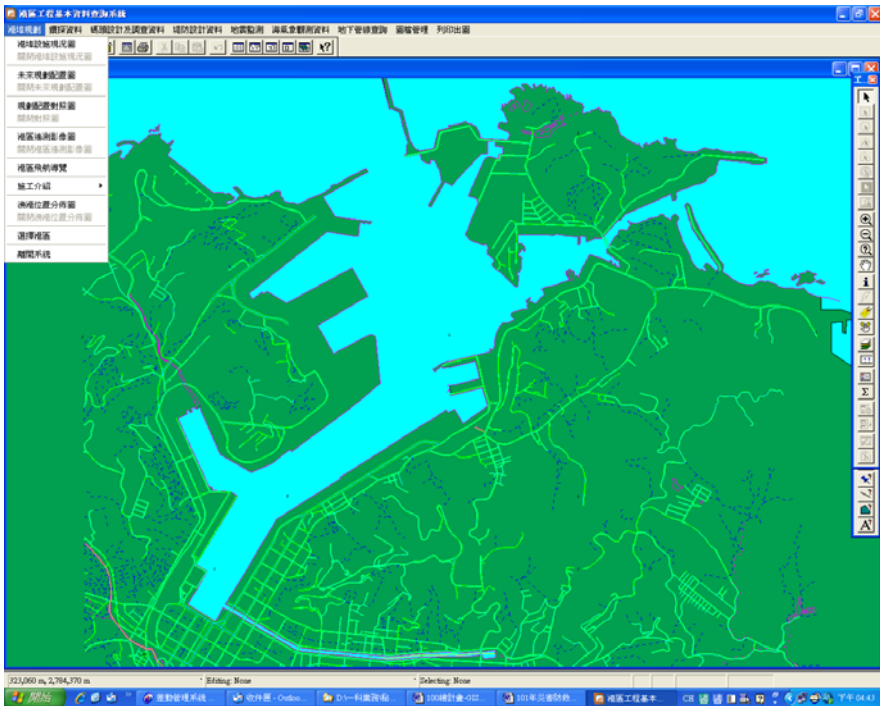


圖 9.2 基隆港區地圖圖層及選單下拉模式

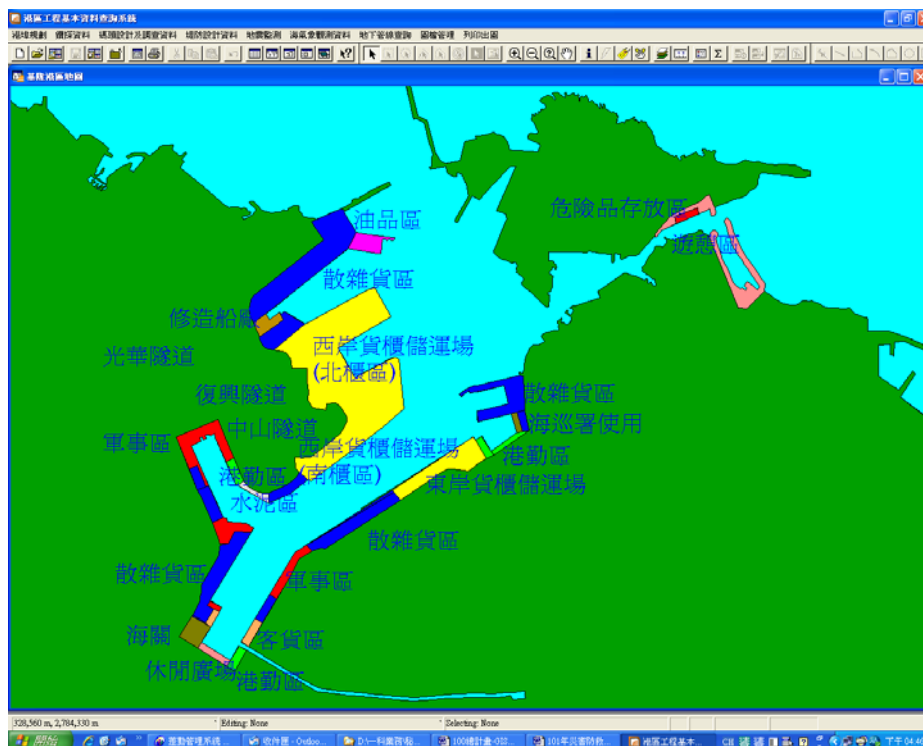


圖 9.3 基隆港區港埠設施現況圖

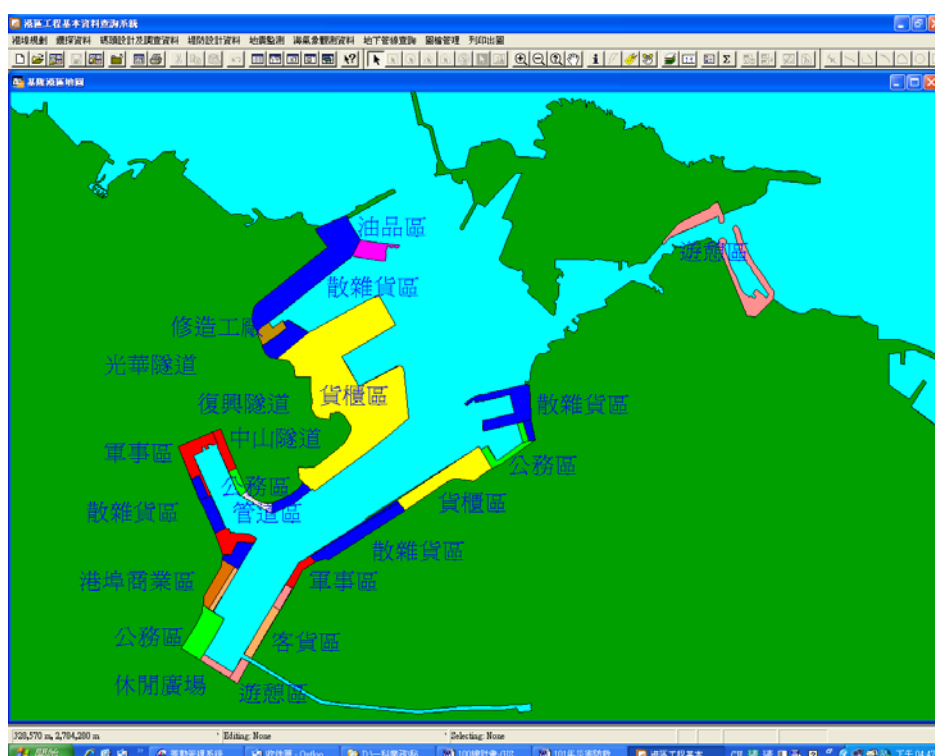


圖 9.4 基隆區港埠未來規劃配置圖

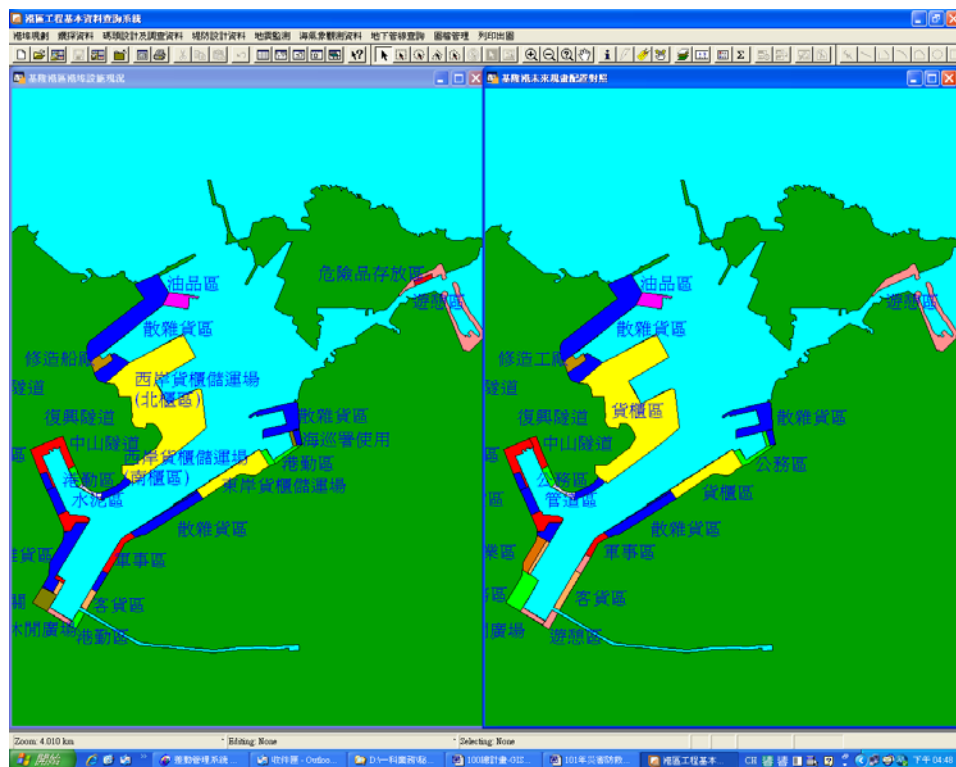


圖 9.5 基隆港區港埠規劃配置對照圖



圖 9.6 基隆港區港區遙測影像圖

第十章 港區地質資料分析建置

本研究已建置的港區地質資料及開發的各項液化分析查詢模組，係架構在本所港研中心所開發的「港區工程基本資料查詢系統」之下，該系統的查詢界面設計成下拉式選單方式。主選單共有六大項，分別為(1)港埠規劃(2)鑽探資料(3)碼頭設計及調查資料(4)堤防設計資料(5)地震監測(6)海氣象現地調查等。由 MapInfo 進入此查詢系統，點選進入所欲查詢的港區，該港區地圖即展示在螢幕上，且原有的 MapInfo 內定選單也同時全部更換成新設計的選單。系統操作及查詢說明如下：

10.1 系統操作程序

本系統之查詢設計，係以下拉式功能表配合物件選項的操作方式為主。使用者可在螢幕上選取所欲查詢的物件，再利用下拉式功能表來展示各項文件資料或繪製相關成果。系統內可查詢到基隆、臺北、臺中、高雄、花蓮、蘇澳等港區之碼頭、堤防、地質及相關文件資料，操作程序如下所示：

1. 在視窗作業環境下，執行 MapInfo 系統，進入該系統內。
2. 點選功能表 File\Run MapBasic Program，選擇 d:\harbor-1 內的執行檔 harbor.mbx，按 OK 選鈕，即進入港區工程基本資料查詢系統。
3. 此時螢幕會展繪出臺灣全島地圖，並標示基隆、臺北、臺中、布袋、高雄、花蓮、蘇澳等港區的分佈位置。
4. 利用滑鼠，點選其中任一港區，則螢幕展繪出該港區的向量地圖，地圖以綠色標示陸面區域位置，以水藍色標示海面區域位置。此時可點選「鑽探資料」主選單下之第一選項「顯示鑽孔位置圖」，系統則載入該港區之鑽孔位置分佈圖。或是點選「碼頭設計及調查資料」主選單下之第一選單「顯示碼頭位置圖」，系統則載入該港區

之碼頭位置分佈圖。

5. 利用工具箱內的放大、縮小、平移等工具，可作地圖縮放，以更精細地查詢目標鑽孔位置及鄰近地形。
6. 選單利用不可點取之設定，避免錯誤點選。

本系統提供不可點取之設定，將暫時不需運作的功能與予停用，待關聯圖層開啟後，再將需用功能啟動。例如「港埠規劃」主選單，其下之第一選項「港埠設施現況圖」或第三選項「未來規劃配置圖」等開啟圖層之功能，都預設為可啟動；而第二選項「關閉港埠設施現況圖」或第四選項「關閉未來規劃配置圖」等關閉圖層之功能，預設為不可啟動(選項顏色為灰白)。系統待第一選項被點取後，第二選項即被更換為可啟動(選項顏色由灰白轉為正常)，第三及第四選項也是如此配搭，系統乃以此種設計來避免錯誤點選。

7. 選用工具箱內的點選工具，再點選所欲查詢之物件。

(1)若所點選的物件為鑽孔位置圖之鑽孔時，主功能表的第二選單(即「鑽探資料」選單)底下所附屬的次選項(即「鑽孔報表資料」選項)，以及「柱狀圖」功能項和四個鑽孔液化分析選項底下所附屬的同名稱次選項(即「單孔或多孔非排序展示」選項、「多孔展示__由西向東排序」選項、「多孔展示__由北向南排序」選項等)，會由啟始的無效狀態轉變為可點取的有效狀態。

(2)若所點選的物件為碼頭分佈位置圖之任一碼頭時，主功能表的第三選單(即「碼頭設計及調查資料」選單)底下所附屬的幾個次選項(如「碼頭設計斷面圖」、「碼頭斷面文字資料」、「碼頭安全檢測影像資料」、「碼頭安全檢測調查記錄」等選項等)，會由啟始的無效狀態轉變為可點取的有效狀態。

(3)若所點選的物件為堤防分佈位置圖之堤防時，主功能表的第四選單(即「堤防資料」選單)底下所附屬的次選項(如「堤防設計斷面

圖」選項)，會由啟始的無效狀態轉變為可點取的有效狀態。

8. 「鑽探資料」已設計成一系列的查詢步驟，包括資料本身的展示及液化分析的序列查詢：
 - (1)當點選到標準貫入試驗鑽孔時，會有一深紅色正方形外框套住被點選的鑽孔位置實心圓標誌，此時可在第二主選單下點選「鑽孔報表資料」選項，系統會開出一新視窗，抬頭名稱為”鑽探資料報表”，視窗內會展示出該鑽探試驗各項數據文字資料。
 - (2)若點選“柱狀圖” 選項底下的次功能項如「多孔展示__由西向東排序」，則系統會開出另一視窗，抬頭名稱為“柱狀圖”，視窗內會展繪出該鑽探結果之土層剖面柱狀圖，且會將兩個以上的柱狀圖由西向東排序展繪出來。
 - (3)若點選任一種液化分析之選項底下的任一次功能項，會出現一對話框，要求選擇地表規模及地表最大加速度，選用某一數值後系統即繪出鑽孔液化分析成果。
 - (4)若欲查詢整個港區之液化分析成果，可點選其中一個液化分析方法底下的「全區液化危險性指數分佈分析」功能項，系統會依據選用的方法及地震強度，分析港區內每一鑽孔的液化推算結果，再與 Surfer 軟體結合，展繪出危害程度的等值分析結果。
9. 當點選到碼頭物件時，該碼頭區會被紅色斜紋所遮罩，此時可點選第六選項「碼頭設計斷面圖」，系統會自動開啟一新的視窗，展繪出該碼頭之斷面圖。又可點選第七選項「碼頭斷面文字資料」，系統會另以一新視窗列出該碼頭之概略描述。也可由「碼頭安全檢測影像資料」選項查詢該碼頭之影像資料，或利用「碼頭安全檢測調查記錄」、「碼頭重大維修記錄」查詢調查結果。
- 10.若要查詢另一港區的碼頭資料，可點選第一主選單「港埠規劃」下的倒數第二選項「選擇港區」，則系統會跳回主畫面顯示港區位置

分佈圖。再依循步驟 4 至 8，可繼續查詢所需港區之相關資料。

11. 結束查詢，可在功能表的第一個主選單「港埠規劃」下，拉出最後一個選項「離開系統」，點選後則可停止本程式的執行。

10.2 蘇澳港地質鑽探資料及液化分析查詢說明

10.2.1 進入查詢系統

1. 按照上一節程式操作程序 1 至 3，使用者可進入查詢系統的主畫面，此時螢幕視窗會展繪出臺灣全島地圖與主要港區的標示位置，如圖 9.1 所示。
2. 將滑鼠遊標移至蘇澳港標示區內，按滑鼠左鍵，可叫出蘇澳港區基本地圖圖層，如圖 10.1 所示。而原有的 MapInfo 內定選單也同時全部更換成新設計的選單。圖 10.1 也展示新設計的主選單「鑽探資料」功能項下拉查詢模式。

10.2.2 地質鑽探資料查詢

下拉查詢系統的第二主選單「鑽探資料」項，可查詢港區附近的鑽孔地質資料及強震下之土壤液化分析，此選單之下計有九個選項，其重要內容及查詢方式如下：

1. 此選單之第一選項為「顯示鑽孔位置圖」，點選後螢幕主畫面港區地圖上隨即出現各個鑽孔位置之標示符號，該符號為藍色實心圓點。使用者可用滑鼠點選所欲查詢的鑽孔，來查看該鑽孔的報表資料及展繪該鑽孔的柱狀圖。蘇澳港的鑽探孔位分佈如圖 10.2 所示。
2. 每一鑽孔之鑽探資料，可用文字或圖形方式來展示。文字資料之資料之展示，係設計成一般鑽探資料之報表格式，使用者在鑽孔位置分佈圖上，先利用滑鼠選取所欲查詢的鑽孔，再下拉「鑽探資料」選單，點選第三選項「鑽孔報表資料」，系統會從資料庫內抓取該

鑽孔資料，依循鑽探報表格式在一新開視窗上填註各項資料，使用者可由此查獲該鑽孔之各項試驗數據。

3. 鑽探結果之圖形展示，係循鑽探深度將各土層按其類別用不同顏色及圖樣繪製成柱狀圖形式，並標示各深度之錘擊強度值 (即 SPT-N 值)。查詢方式仍須先用滑鼠在鑽孔位置分佈圖上選取所欲查詢的鑽孔，可選單孔作單孔柱狀圖的展繪，也可一次選取多孔作多孔柱狀圖展繪，(使用者只需在選取第一孔後，按住鍵盤<shift>鍵，則可繼續選取其它鑽孔來作多孔展繪)。鑽孔選取完畢，下拉「鑽探資料」選單，點選第四選項「柱狀圖」，再點選柱狀圖展繪排序方式，系統會從資料庫內抓取各鑽孔資料來繪圖，圖 10.3 所示為五個鑽孔由北向南排序之柱狀圖繪製結果。

10.2.3 Liao 液化機率分析成果展示

1. 柱狀圖繪製完畢後，所選取之鑽孔，也可接續來作液化機率分析，以了解在不同強度之地震侵襲下，各個土層發生液化的機率大小。使用者可在「鑽探資料」選單下，點選第五選項「Liao_液化機率分析」，再點選其排序方向，螢幕隨即出現一對話框，內含不同地震規模及最大加速度之選鈕，如圖 10.4 所示。在對話框內選取某一地震強度，按確定鈕之後，系統即開啟一新視窗，並在此視窗內繪製所選鑽孔在該地震強度下之液化機率分析圖，如圖 10.5 所示。該分析法係採用 Liao et al.(1988)之邏輯迴歸分析模式，而分析成果圖上採用不同顏色來代表不同分析之結果，藍色代表不會液化之土層，而白色到正紅色之顏色漸層變化代表液化機率由 0 到 1 之漸增變化程度，顏色愈紅代表機率值愈高，該土層愈容易發生液化。
2. 除了每個鑽孔的液化分析外，本研究也對整個港區作全面性的液化危險度分析，使用者可由「鑽探資料」選單下的第五選項「Liao_液化機率分析」，拉出「Lai 全區液化危險性指數分佈分析」次選項，程式會呼叫機率危害度分析模組，將全港區所有鑽孔之危害度求算

出來，再呼叫 Surfer 軟體，依據賴聖耀的危險度分類等級，繪製分析成果，如圖 10.6 所示。其中液化危險性指數大於 0.4 者，以紅色展繪；界於 0.2 到 0.4 者，以黃色展繪；而小於 0.2 者，以綠色展繪。使用者可清楚分辨出液化程度高中低等區域分佈情況。

10.2.4 Seed 液化分析成果展示

1. 柱狀圖繪製完畢後，所選取之鑽孔，可接續來作液化分析，以了解在不同強度之地震侵襲下，各個土層發生液化的可能。使用者可在「鑽探資料」選單下，點選第七選項「Seed_液化分析」，再點選其排序方向，螢幕隨即出現一對話框，內含不同地震規模及最大加速度之選鈕。在對話框內選取某一地震強度，按確定鈕之後，系統即開啟一新視窗，並在此視窗內繪製所選鑽孔在該地震強度下之抗液化安全係數柱狀圖，如圖 10.7 所示。該分析法係採用 NCCER 修正之 Seed 簡易經驗法 (1997)，在分析成果圖上本系統採用不同顏色來代表不同分析之結果，藍色代表不會液化之土層，紅色代表安全係數小於 1，即會發生液化之土層。綠色代表安全係數大於 1，即不會發生液化之土層。
2. 除了每個鑽孔的液化分析外，本研究也對整個港區作全面性的液化危險度分析，使用者可由「鑽探資料」選單下的第七選項「Seed_液化分析」，拉出「Iwasaki 全區液化危險性指數分佈分析」次選項，程式會呼叫安全係數危害度分析模組，將全港區所有鑽孔之危害度求算出來，再呼叫 Surfer 軟體，依據 Iwasaki 的危險度分類等級，繪製分析成果，如圖 10.8 所示。其中液化潛能指數大於 15 者，以紅色展繪；界於 5 到 15 者，以黃色展繪；而小於 5 者，以綠色展繪。使用者可清楚分辨出液化程度高中低等區域分佈情況。
3. 其它分析方法之推估結果，也可依據上述方法查詢而得。

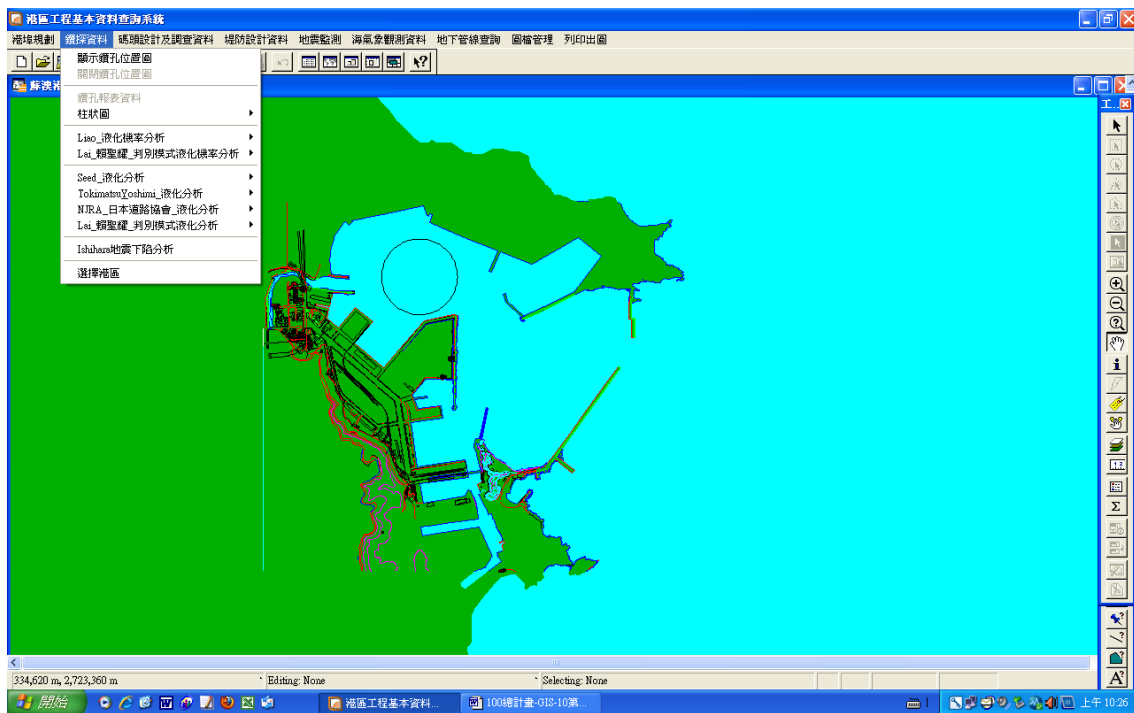


圖 10.1 蘇澳港區地圖圖層及選單下拉模式

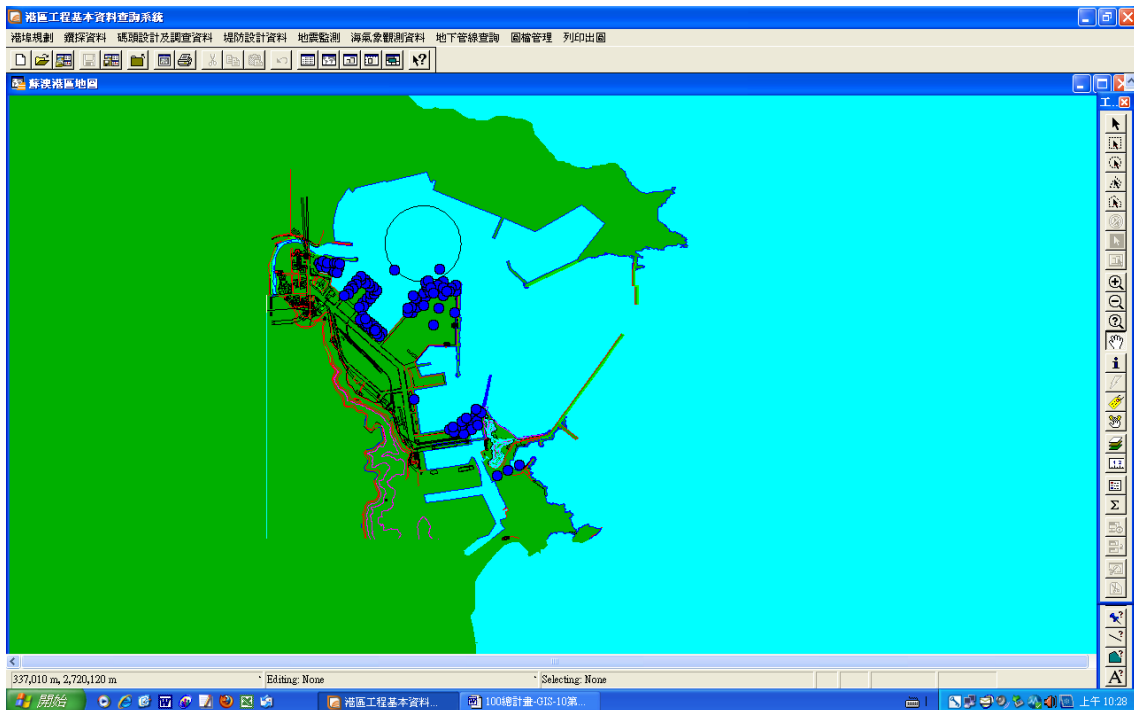


圖 10.2 蘇澳港區鑽探孔位分佈圖

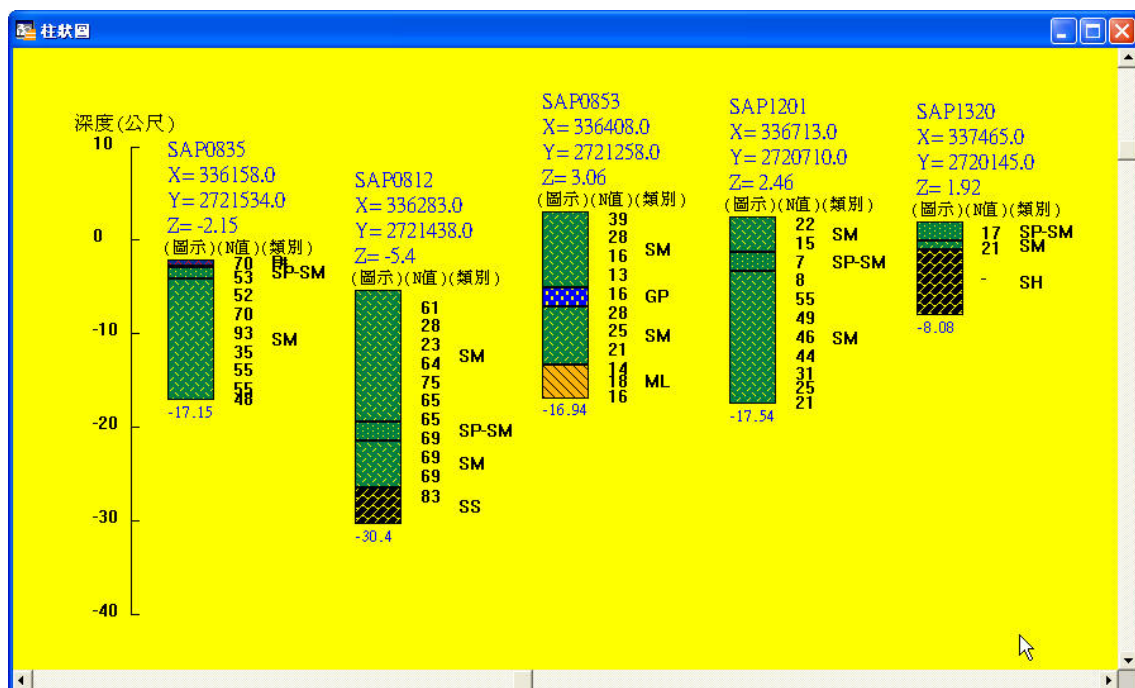


圖 10.3 蘇澳港區鑽孔柱狀圖

Figure 10.4 is a dialog box titled "請選擇地震強度" (Please select earthquake intensity). It contains a list of earthquake events and their corresponding magnitudes (M) and maximum accelerations (g). The selected option is "台灣地震甲區: 7.5M, 0.33g".

地震規模M 最大加速度g

- ☐ 5.0 0.03
- ☐ 5.5 0.05
- ☐ 6.0 0.075
- ☐ 6.5 0.10
- ☐ 7.0 0.15
- ☐ 7.5 0.25
- ☐ 1935年新竹台中烈震台中港區: 7.1M, 0.15g
- ☐ 1999年集集烈震台中港區: 7.3M, 0.163g
- ☐ 1995年阪神烈震神戶港區: 7.2M, 0.55g
- ☒ 台灣地震甲區: 7.5M, 0.33g
- ☐ 台灣地震乙區: 7.5M, 0.23g

地震規模M= , 最大加速度g=

OK Cancel

圖 10.4 地震強度選取對話框

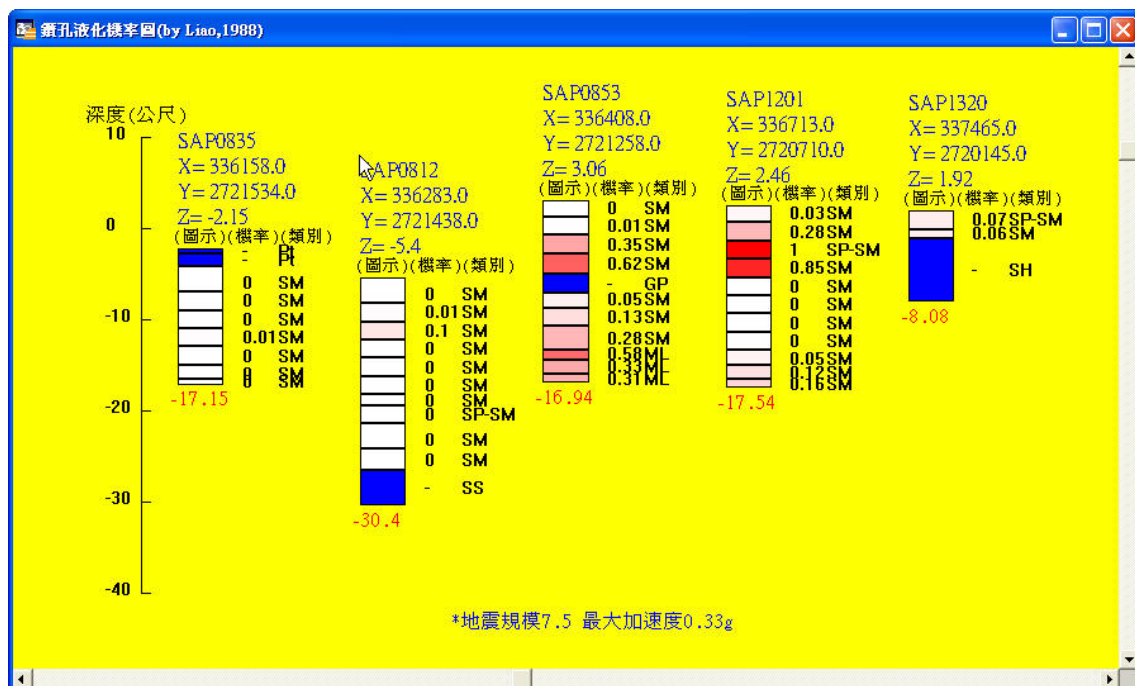


圖 10.5 蘇澳港區鑽孔 Liao 液化機率分析結果柱狀圖

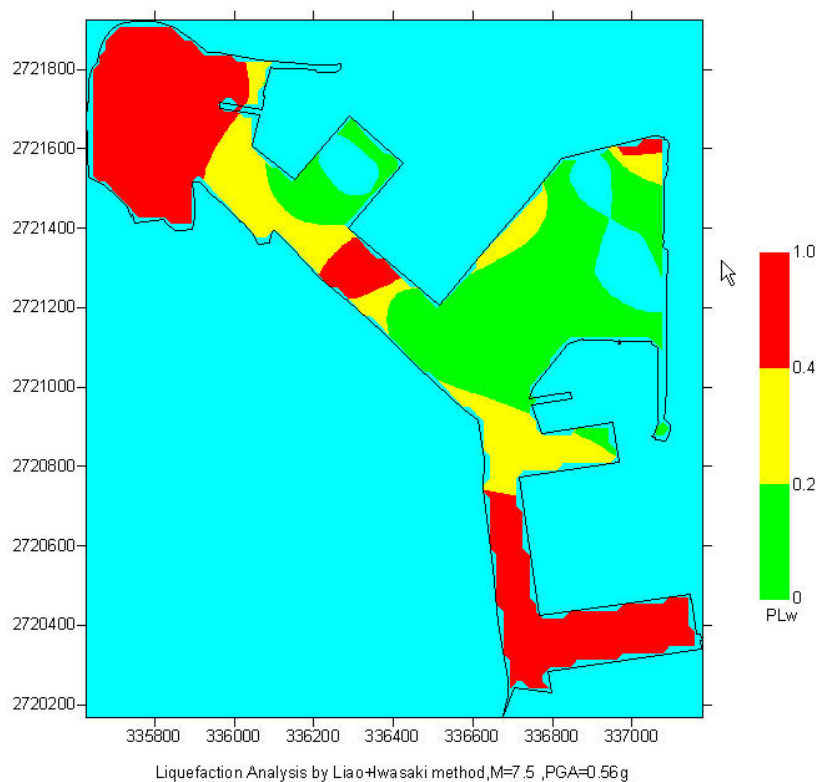


圖 10.6 蘇澳港區 Liao+Lai 法全區液化危險性指數分佈圖

10.2.5 Lai (賴聖耀, 2003) 本土化液化機率分析成果展示

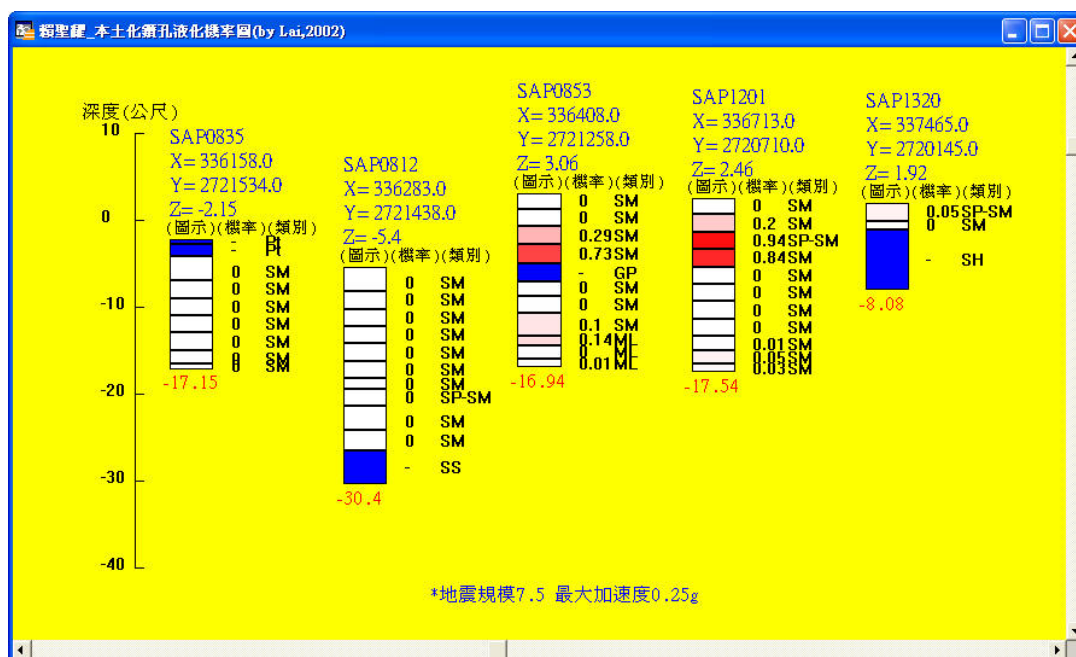
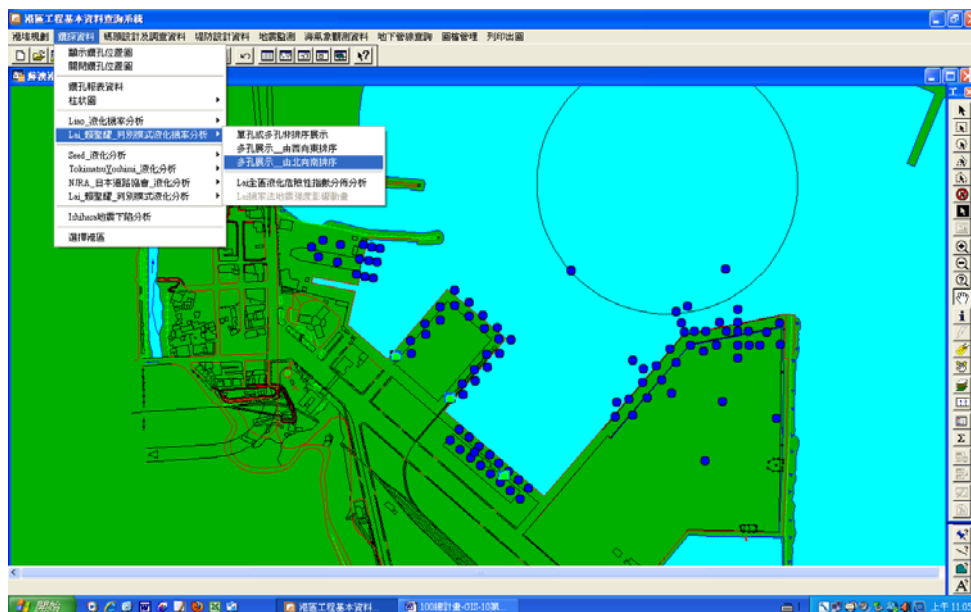
1. 賴聖耀(2003)所收 921 集集地震及國外液化與非液化案例，利用判別分析(discriminant analysis)方法，發展出以標準貫入試驗(SPT) 評估土壤液化潛能之本土化安全係數及液化機率分析方法。利用 Lai 的方法，在查詢系統上可點取鑽孔來作液化分析，以了解在不同強度之地震侵襲下，各個土層發生液化的機率大小。Lai 液化機率分析方法查詢選單下拉模式如圖 10.9 所示，使用者可在「鑽探資料」選單下，點選第六選項「Lai_賴聖耀_本土化液化機率分析」，再點選其排序方向，螢幕隨即出現一對話框，內含不同地震規模及最大加速度之選鈕，如圖 10.5 所示。在對話框內選取某一地震強度，按確定鈕之後，系統即開啟一新視窗，並在此視窗內繪製所選鑽孔在該地震強度下之液化機率分析圖，如圖 10.10 所示。分析成果圖上採用不同顏色來代表不同分析之結果，藍色代表未做液化分析之土層，而白色到正紅色之顏色漸層變化代表液化機率由 0 到 1 之漸增變化程度，顏色愈紅代表機率值愈高，該土層愈容易發生液化。
2. 除了每個鑽孔的液化分析外，本研究也對整個港區作全面性的液化危險度分析，使用者可由「鑽探資料」選單下，點選第六選項「Lai_賴聖耀_判別模式液化機率分析」，拉出「Lai 全區液化危險性指數分佈分析」次選項，程式會呼叫機率危害度分析模組，將全港區所有鑽孔之危害度求算出來，再呼叫 Surfer 軟體，依據賴聖耀的危險度分類等級，繪製分析成果，如圖 10.11 所示。其中液化危險性指數大於 0.4 者，以紅色展繪；界於 0.2 到 0.4 者，以黃色展繪；而小於 0.2 者，以綠色展繪。使用者可清楚分辨出液化程度高中低等區域分佈情況。

10.2.6 Lai (賴聖耀, 2003) 本土化安全係數液化分析成果展示

1. 利用賴聖耀(2003)所發展的本土化安全係數分析方法，在查詢系統上可點取鑽孔來作液化分析，以了解在不同強度之地震侵襲下，各

個土層發生液化的可能。使用者可在「鑽探資料」選單下，點選第十選項「Lai_賴聖耀_判別模式液化分析」，再點選其排序方向，螢幕隨即出現一對話框，內含不同地震規模及最大加速度之選鈕，如圖 10.5 所示。在對話框內選取某一地震強度，按確定鈕之後，系統即開啟一新視窗，並在此視窗內繪製所選鑽孔在該地震強度下之抗液化安全係數柱狀圖，如圖 10.12 所示。在分析成果圖上本系統採用不同顏色來代表不同分析之結果，藍色代表未做分析（不會液化）之土層，紅色代表安全係數小於 1，即會發生液化之土層。綠色代表安全係數大於 1，即不會發生液化之土層。

2. 除了每個鑽孔的液化分析外，本研究也對整個港區作全面性的液化危險度分析，使用者可由「鑽探資料」選單下的第十選項「Lai_賴聖耀_本土化液化分析」，拉出「Iwasaki 全區液化危險性指數分佈分析」次選項，程式會呼叫安全係數危害度分析模組，將全港區所有鑽孔之危害度求算出來，再呼叫 Surfer 軟體，依據 Iwasaki 的危險度分類等級，繪製分析成果，如圖 10.13 所示。其中液化潛能指數大於 15 者，以紅色展繪；界於 5 到 15 者，以黃色展繪；而小於 5 者，以綠色展繪。使用者可清楚分辨出液化程度高中低等區域分佈情況。
3. 其它分析方法之推估結果，也可依據上述方法查詢而得。



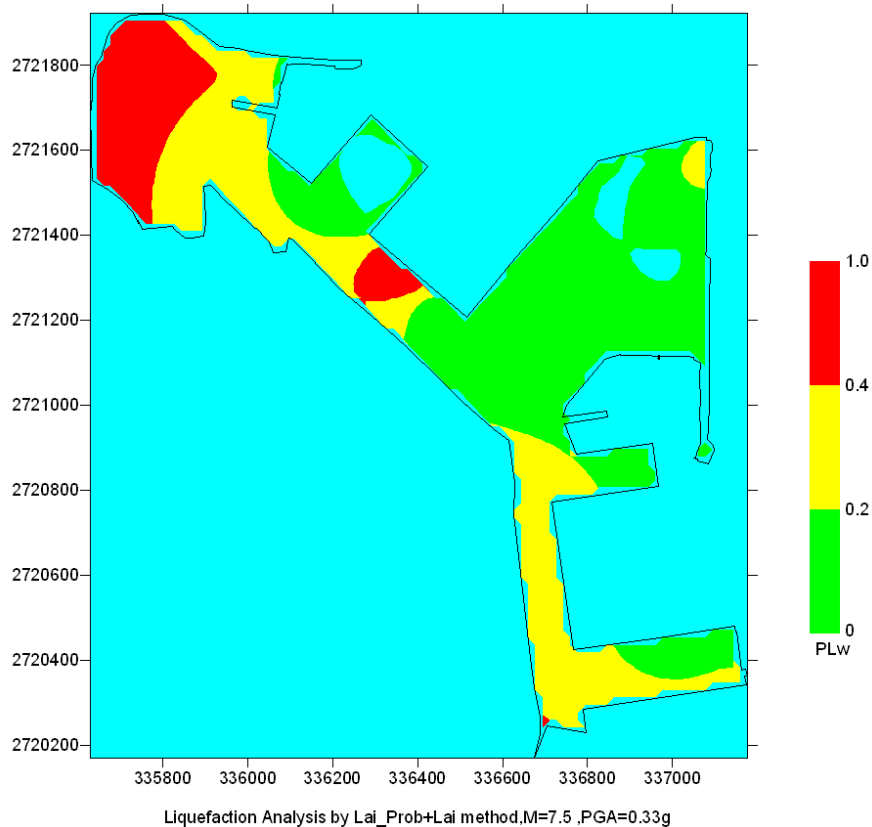


圖 10.11 蘇澳港區 Lai_Prob+Lai 法全區液化危險性指數分佈圖

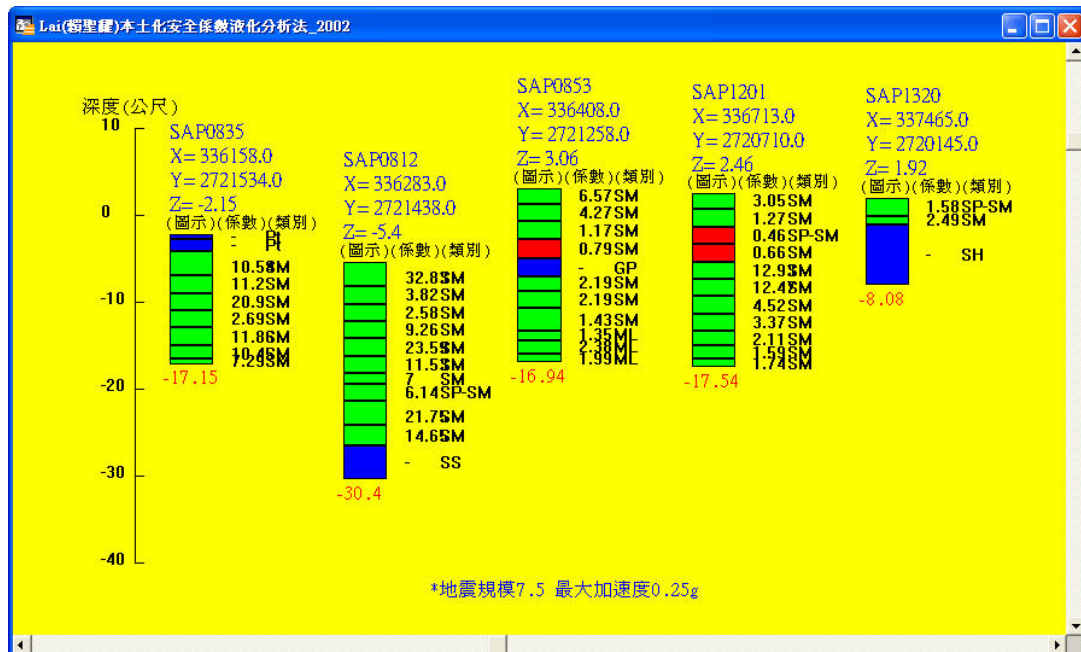


圖 10.12 蘇澳港區 Lai 抗液化安全係數柱狀圖

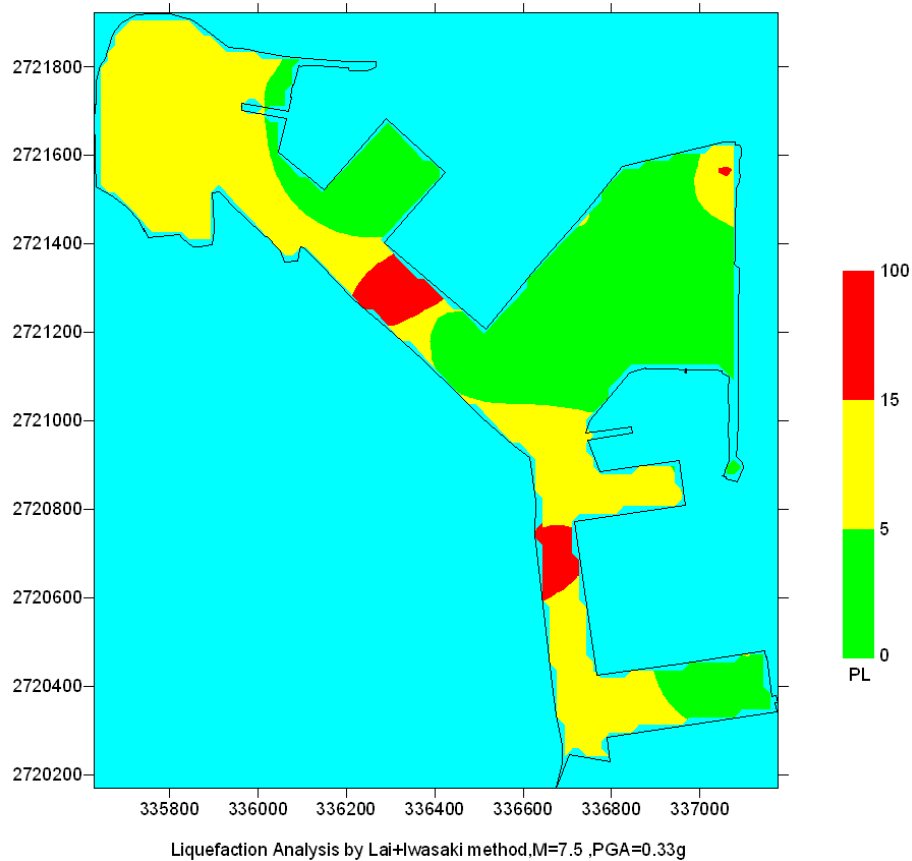


圖 10.13 蘇澳港區 Lai-Iwasaki 法全區液化危險性指數分佈圖

10.2.7 Ishihara 地震下陷分析成果展示

本研究利用紀雲曜(1997)以回歸分析所求得的 Ishihara & Yashimine 安全係數與最大減應變關係曲線之函數，配合賴聖耀(2002)本土化液化分析所求得的安全係數，來撰寫地震下陷分析程式及下陷潛能繪圖模組，用以展繪不同強度之地震侵襲下，蘇澳港區因地震發生下陷的可能。使用者可在「鑽探資料」選單下，點選第十一選項「Ishihara 地震下陷分析」，螢幕隨即出現一對話框，內含不同地震規模及最大加速度之選鈕，如圖 10.4 所示。在對話框內選取某一地震強度，按確定鈕之後，系統即呼叫地震下陷分析模組，將全港區所有鑽孔之可能下陷量求算出來，再呼叫 Surfer 軟體，繪製分析成果，如圖 10.14 所示。使用者可清楚分辨出液化程度高中低等區域分佈情況。

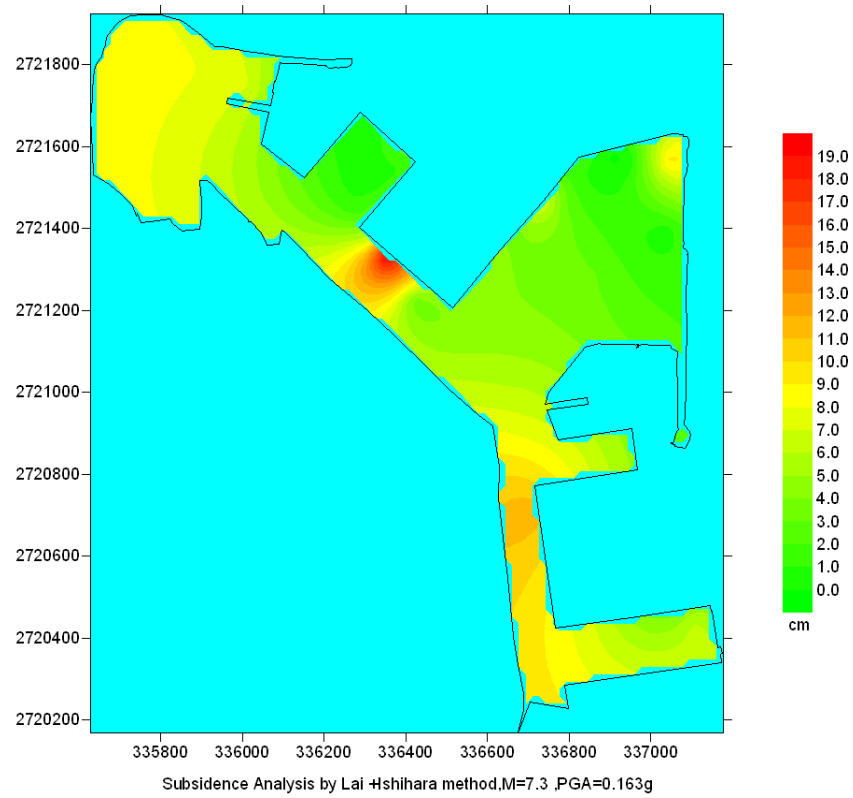


圖 10.14 地震下陷分析成果圖

第十一章 貨櫃碼頭營運資料查詢展示

11.1 貨櫃碼頭營運資料更新建置概況

臺灣主要經營櫃進出口的商業港埠，計有高雄、臺中及基隆等三個國際大港，這三個港都建有貨櫃碼頭及貨櫃裝卸設施，諸如卸載貨櫃的貨櫃起重機、搬運貨櫃的門式機及暫時放置貨櫃的貨櫃堆置場，且每年都有大量的貨櫃進出。通常貨櫃運量的使用需求上，大都以整個港的進出口量或承租航商的年營運量來做統計，以供公部門經營籌畫及專家學者分析研究需用；但為了解各個貨櫃碼頭年度荷載量及使用頻率的高低，以供碼頭工程維護及預算編列的考量，需要較詳細的來統計各個碼頭的年營運量。故本所港灣研究中心的港灣工程基本資料庫中，也在碼頭資料庫中增添貨櫃碼頭營運資料項，該項資料已登錄 1998 年至 2009 年的資料，本研究在年度內增列 2010 年資料量。

11.2 貨櫃碼頭營運資料配置圖層及屬性資料錄說明

本研究將高雄港、臺中港及基隆港港區內貨櫃碼頭之分佈位置繪製於 Container_TEU.tab 圖層檔內，而圖上每一貨櫃碼頭物件之屬性資料也對照登錄到資料庫表格檔內。以高雄港為例，貨櫃碼頭屬性資料共設計成 13 個欄位，依序為：碼頭、1998 年、1999 年、2000 年、2001 年、2002 年、2003 年、2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年、2009 年、2010 年、租賃公司等，其欄位名稱，中文說明，資料型態及長度如表 11-1 所示。

表 11-1 貨櫃碼頭營運設計使用資料檔案及資料錄說明

系統名稱：港區基本工程資料查詢系統			日期： / /	
檔案名稱：Container_TEU			檔案格式：表格(.DBF)	
檔案說明：碼頭貨櫃裝卸量及登錄年度資料				
編號	欄位名稱	欄位中文說明	資料型態及長度	備 註
1	碼頭	碼頭編號	Char (15)	
2	1998 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
3	1999 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
4	2000 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
5	2001 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
6	2002 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
7	2003 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
8	2004 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
9	2005 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
10	2006 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
11	2007 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
12	2008 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
13	2009 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
14	2010 年	貨櫃裝卸量	Integer	單位：TEU
15	租賃公司	租賃公司	Char (30)	

11.3 貨櫃碼頭營運資料查詢展示模組設計

11.3.1 查詢選單設計規劃

貨櫃碼頭營運資料經數化建檔後，貯放在「港區基本工程資料查詢展示系統」資料庫內。而相關資料之查詢，係設計成下拉式選單方式，配合對話框輸入查詢資料。查詢選單劃設為三項，分別為：

1. 顯示貨櫃碼頭位置分佈
2. 關閉貨櫃碼頭位置分佈
3. 貨櫃裝卸量統計圖表

該三項選單架構在查詢系統的第三主選單「碼頭設計及調查資料」項下，而「貨櫃裝卸量統計圖表」選單又可下拉出六個次選單：

1. 單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪
2. 單一碼頭_貨櫃裝卸量統計表展示
3. 多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪
4. 多選碼頭_貨櫃裝卸量統計表展示
5. 全港區_貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪
6. 全港區_貨櫃碼頭裝卸量統計表展示

11.3.2 查詢模組設計規劃

貨櫃碼頭營運資料數化建檔後，貯放在資料庫高雄港、臺中港及基隆港港區資料夾底下。接著利用 MapBasic 程式語言，撰寫查詢及展繪模組，該模組命名為 Container_quantity，模組下分六個副程式，其功能依序說明如下：

- (1)Show_Container_Whrf 副程式：顯示貨櫃碼頭的位置。
- (2)Close_Container_Whrf 副程式：隱藏貨櫃碼頭的位置。
- (3)Whrf_TEU_graph 副程式：顯示所點選之貨櫃碼頭分年裝卸量三維柱狀展示圖。
- (4)Port_TEU_graph 副程式：顯示全港區貨櫃碼頭分年裝卸量三維柱狀展示圖。
- (5)Whrf_TEU_Table 副程式：顯示所點選之貨櫃碼頭分年裝卸量統計表。
- (6)Port_TEU_Table 副程式：顯示全港區貨櫃碼頭分年裝卸量統計表。

11.4 貨櫃碼頭營運資料查詢展示操作程序

本研究所建置的貨櫃碼頭營運資料及新開發的查詢模組，係架構在本中心所開發的「港區基本工程資料查詢展示系統」之下，該系統的查詢界面設計成下拉式選單方式。主選單共有六大項，分別為(1)港埠規劃(2)鑽探資料(3)碼頭設計及調查資料(4)堤防設計資料(5)海氣象現地調查等。由 MapInfo 進入此查詢系統，點選進入所欲查詢的港區，該港區地圖即展示在螢幕上，且原有的 MapInfo 內定選單也同時全部更換成新設計的選單，供使用者點取需用功能。

系統之查詢設計，係以下拉式選單配合物件選項的操作方式為主。使用者可在螢幕上選取所欲查詢的物件，再利用下拉式選單來展示各項文件資料或繪製相關成果。港區貨櫃碼頭營運資料查詢展示之操作程序如下：

1. 在視窗作業環境下，執行 MapInfo 系統，進入該系統內。
2. 點取選單 File\Run MapBasic Program，選擇 d:\harbor-1 內的執行檔 harbor.mbx，按 OK 選鈕，即進入港區工程基本資料查詢展示系統。
3. 此時螢幕會展繪出臺灣全島地圖，並標示基隆、臺北、臺中、高雄、花蓮、蘇澳等港區的分佈位置。
4. 利用滑鼠，點選欲查詢之港區，則螢幕展繪出該港區的向量地圖，地圖以綠色標示陸面區域位置，以水藍色標示海面區域位置。此時可點選「碼頭設計及調查資料」主選單下之第十九選項「顯示貨櫃碼頭分佈位置圖」，系統則載入該港區之貨櫃碼頭位置分佈圖，貨櫃碼頭以黃色展繪。
5. 利用工具箱內的放大、縮小、平移等工具，可作地圖縮放，以更精細地查詢目標位置及鄰近地形。
6. 選用工具箱內的點選工具，再點選所欲查詢之碼頭。若只點選一個

碼頭，此時「貨櫃裝卸量統計圖表」功能項底下所附屬的次選項「單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。若點選兩個以上碼頭，此時「貨櫃裝卸量統計圖表」功能項底下所附屬的次選項「多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。

7. 點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，可查得該碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖。或點選：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，可查得所選取碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖。若點選：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「全港區_貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪」，系統則展繪全港區碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖。統計圖展繪後，接著可以展示統計表。使用者可依自己的需求來查詢資料。
8. 若要查詢另一港區的相關資料，可點選第一主功能項下的“選擇港區”功能，則系統會跳回主畫面。可依循步驟 4 至 7，繼續查詢其他港區的資料。
9. 結束查詢，可由功能表的最後一個功能項“視窗控制”下拉出“離開系統”次功能項，點選後則可停止本程式的執行。

11.5 高雄港貨櫃碼頭營運資料查詢展示

高雄港貨櫃碼頭營運資料查詢展示之操作程序如下：

1. 按照 11.4 節程式操作程序 1 至 3，使用者可進入查詢系統的主畫面，此時螢幕會展繪出臺灣全島地圖，並標示基隆、臺中、高雄、花蓮、蘇澳等港區的分佈位置，如圖 9.1 所示。
2. 利用滑鼠，點選高雄港，則螢幕展繪出高雄港區的向量地圖，地圖以綠色標示陸面區域位置，以水藍色標示海面區域位置。此時可點選「碼頭設計及調查資料」主選單下之第十九選項「顯示貨櫃碼頭分佈位置

圖」，系統則載入該港區之貨櫃碼頭位置分佈圖，貨櫃碼頭以黃色展繪，如圖 11.1 所示。

3. 選用工具箱內的點選工具，再點選所欲查詢之碼頭。若只點選一個碼頭，此時「貨櫃裝卸量統計圖表」功能項底下所附屬的次選項「單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。若點選兩個以上碼頭，此時「貨櫃裝卸量統計圖表」功能項底下所附屬的次選項「多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。選單呈列狀況如圖 11.2 所示。
4. 點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，可查得該碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖，高雄港單一碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪如圖 11.3 所示。
5. 或點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，可查得所選取碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖，高雄港多選碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪如圖 11.4 所示。
6. 若點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「全港區_貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪」，系統則展繪全港區碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖。高雄港全港區貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪如圖 11.5 所示。
7. 統計圖展繪後，接著可以展示統計表。使用者可依自己的需求來查詢資料。

11.6 臺中港貨櫃碼頭營運資料查詢展示

臺中港貨櫃碼頭營運資料查詢展示之操作程序如下：

1. 按照 11.4 節程式操作程序 1 至 3，使用者可進入查詢系統的主畫面，此時螢幕會展繪出臺灣全島地圖，並標示基隆、臺中、高雄、花蓮、蘇澳等港區的分佈位置，如圖 9.1 所示。
2. 利用滑鼠，點選臺中港，則螢幕展繪出臺中港區的向量地圖，地圖

以綠色標示陸面區域位置，以水藍色標示海面區域位置。此時可點選「碼頭設計及調查資料」主選單下之第十九選項「顯示貨櫃碼頭分佈位置圖」，系統則載入該港區之貨櫃碼頭位置分佈圖，貨櫃碼頭以黃色展繪，如圖 11.6 所示。

3. 選用工具箱內的點選工具，再點選所欲查詢之碼頭。若只點選一個碼頭，此時「貨櫃裝卸量統計圖表」功能項底下所附屬的次選項「單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。若點選兩個以上碼頭，此時「貨櫃裝卸量統計圖表」功能項底下所附屬的次選項「多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。
4. 點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，可查得該碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖，臺中港單一碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪如圖 11.7 所示。
5. 或點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，可查得所選取碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖，臺中港多選碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪如圖 11.8 所示。
6. 若點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「全港區_貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪」，系統則展繪全港區碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖。臺中港全港碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪如圖 11.9 所示。
7. 統計圖展繪後，接著可以展示統計表。使用者可依自己的需求來查詢資料。

11.7 基隆港貨櫃碼頭營運資料查詢展示

基隆港貨櫃碼頭營運資料查詢展示之操作程序如下：

1. 按照 11.4 節程式操作程序 1 至 3，使用者可進入查詢系統的主畫面，

此時螢幕會展繪出臺灣全島地圖，並標示基隆、臺中、高雄、花蓮、蘇澳等港區的分佈位置，如圖 9.1 所示。

2. 利用滑鼠，點選基隆港，則螢幕展繪出基隆港區的向量地圖，地圖以綠色標示陸面區域位置，以水藍色標示海面區域位置。此時可點選「碼頭設計及調查資料」主選單下之第十九選項「顯示貨櫃碼頭分佈位置圖」，系統則載入該港區之貨櫃碼頭位置分佈圖，貨櫃碼頭以黃色展繪，如圖 11.10 所示。
3. 選用工具箱內的點選工具，再點選所欲查詢之碼頭。若只點選一個碼頭，此時「貨櫃裝卸量統計圖表」功能項底下所附屬的次選項「單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。若點選兩個以上碼頭，此時「貨櫃裝卸量統計圖表」功能項底下所附屬的次選項「多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。
4. 點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「單一碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，可查得該碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖，基隆港單一碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪如圖 11.11 所示。
5. 或點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「多選碼頭_貨櫃裝卸量統計圖展繪」，可查得所選取碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖，基隆港多選碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪如圖 11.12 所示。
6. 若點選選單：「碼頭設計及調查資料」\「貨櫃裝卸量統計圖表」\「全港區_貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪」，系統則展繪全港區碼頭歷年貨櫃裝卸量統計成果圖。基隆港全港區貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪如圖 11.13 所示。
7. 統計圖展繪後，接著可以展示統計表。使用者可依自己的需求來查詢資料。

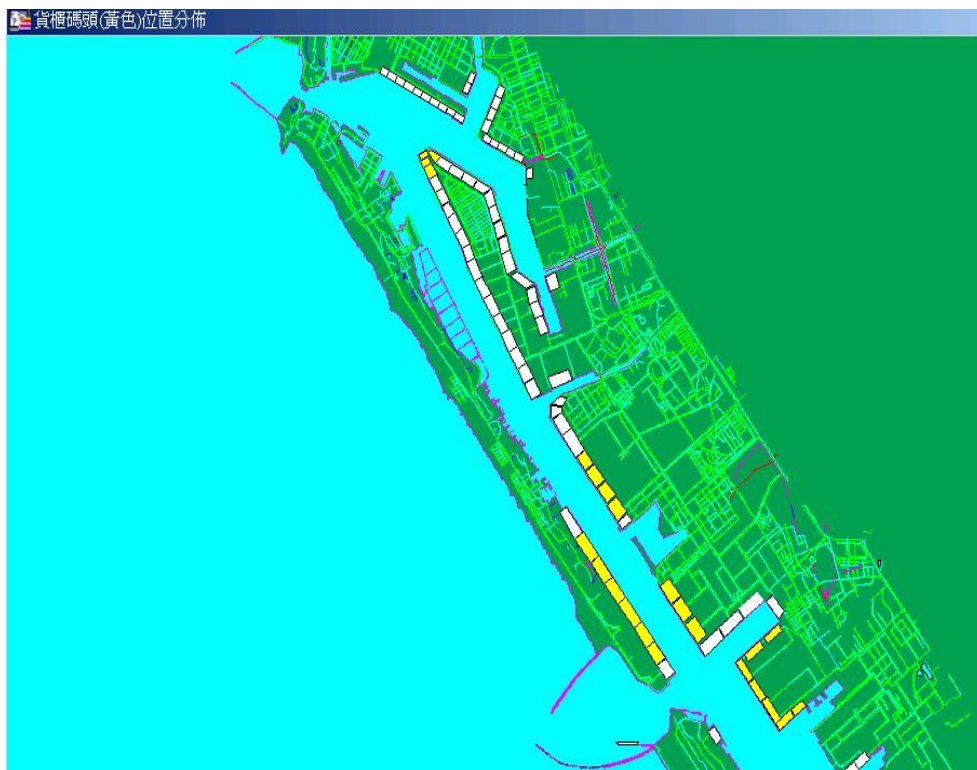


圖 11.1 高雄港貨櫃碼頭分佈位置圖

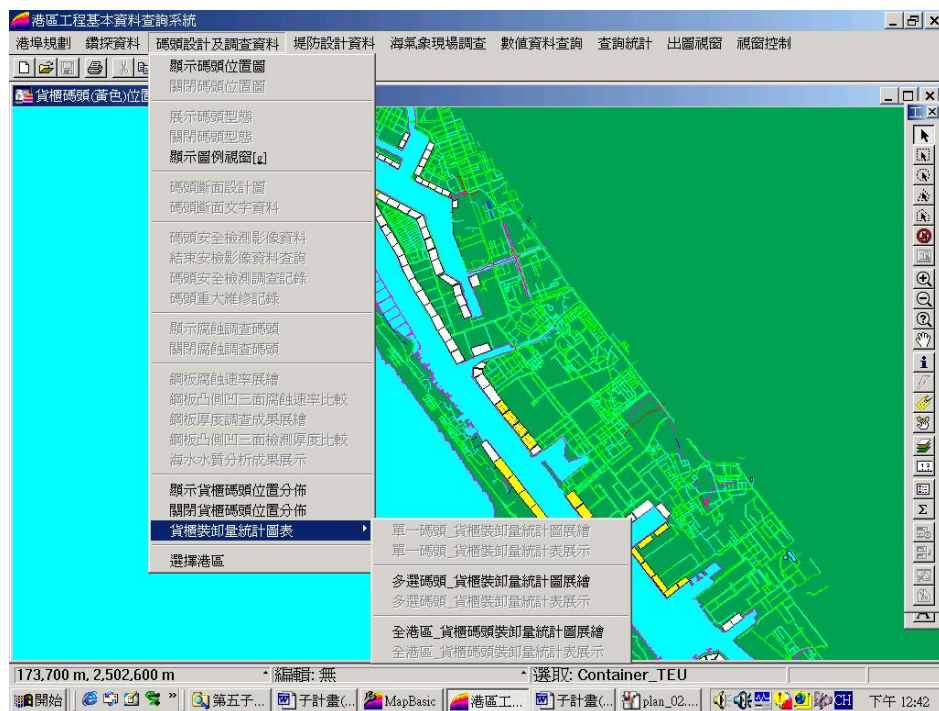


圖 11.2 高雄港貨櫃裝卸量選單呈列狀況圖

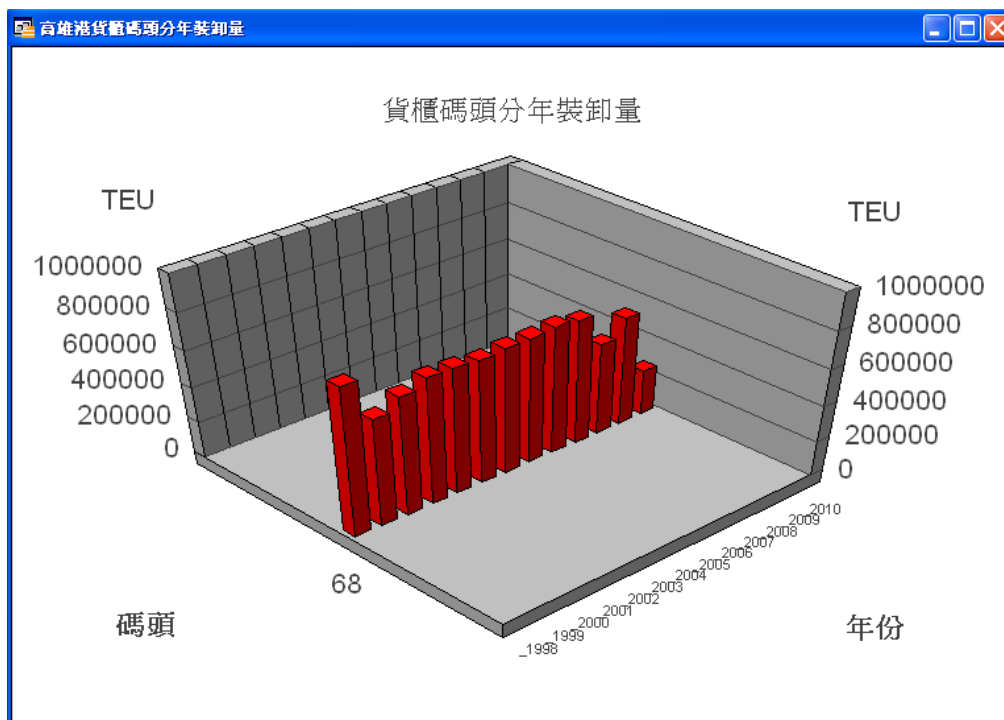


圖 11.3 高雄港單一碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪

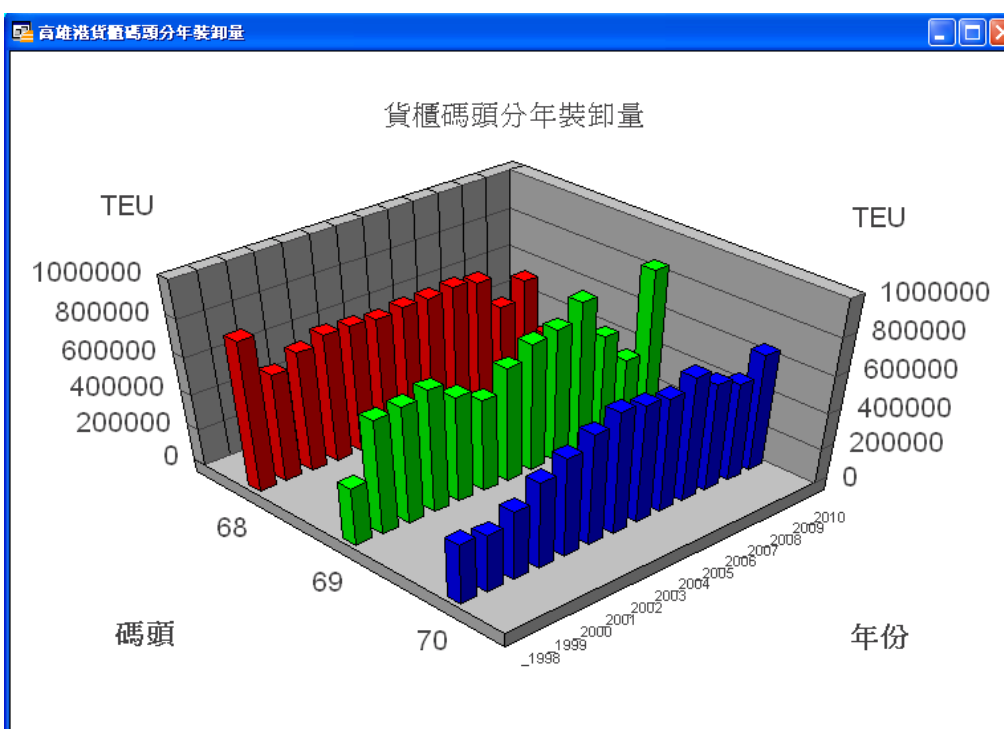


圖 11.4 高雄港多選碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪

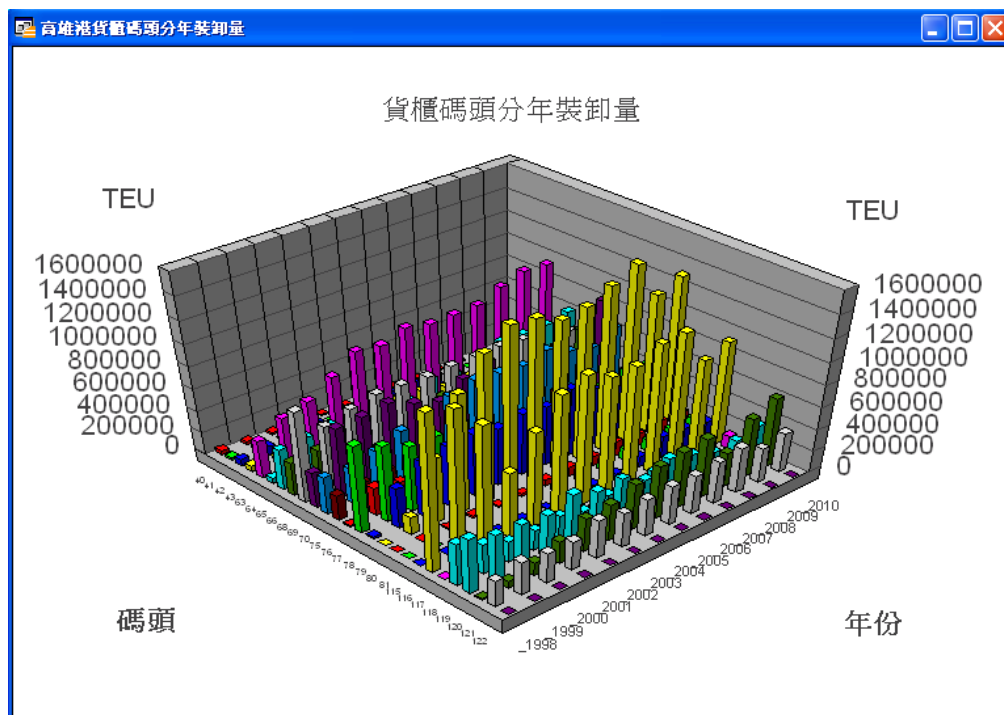


圖 11.5 高雄港全港區貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪



圖 11.6 臺中港貨櫃碼頭分佈位置圖

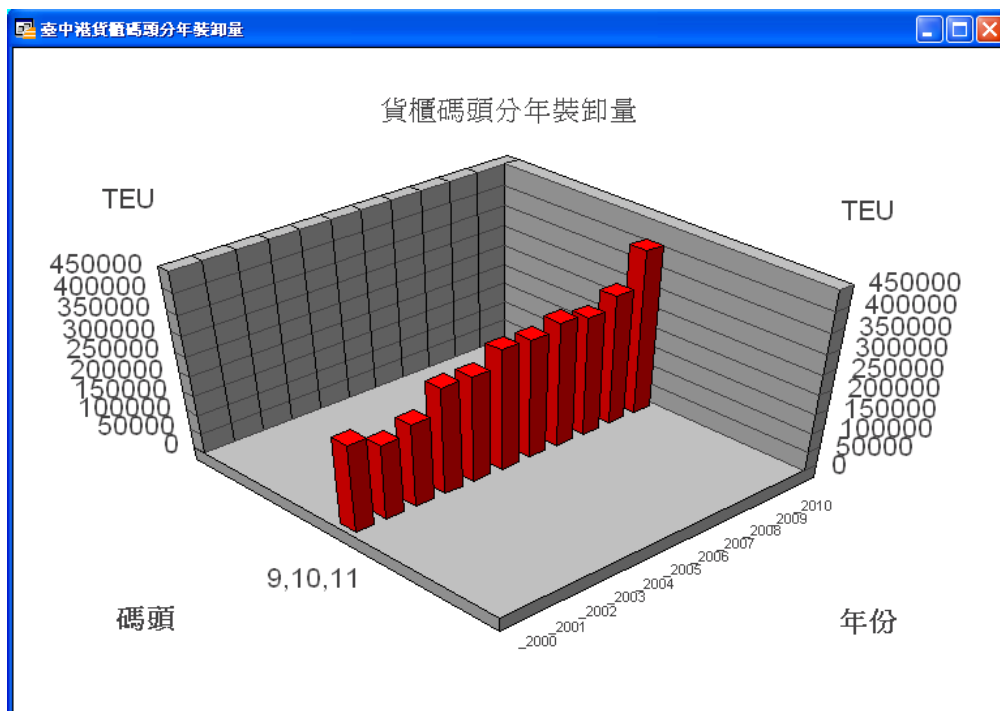


圖 11.7 臺中港單一碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪

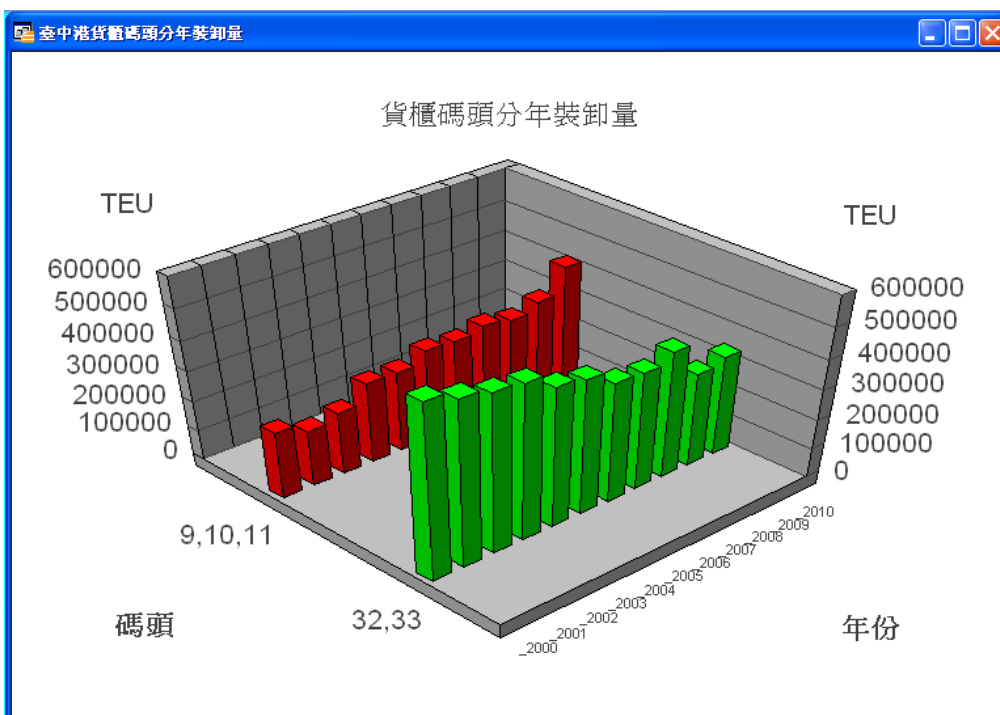


圖 11.8 臺中港多選碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪

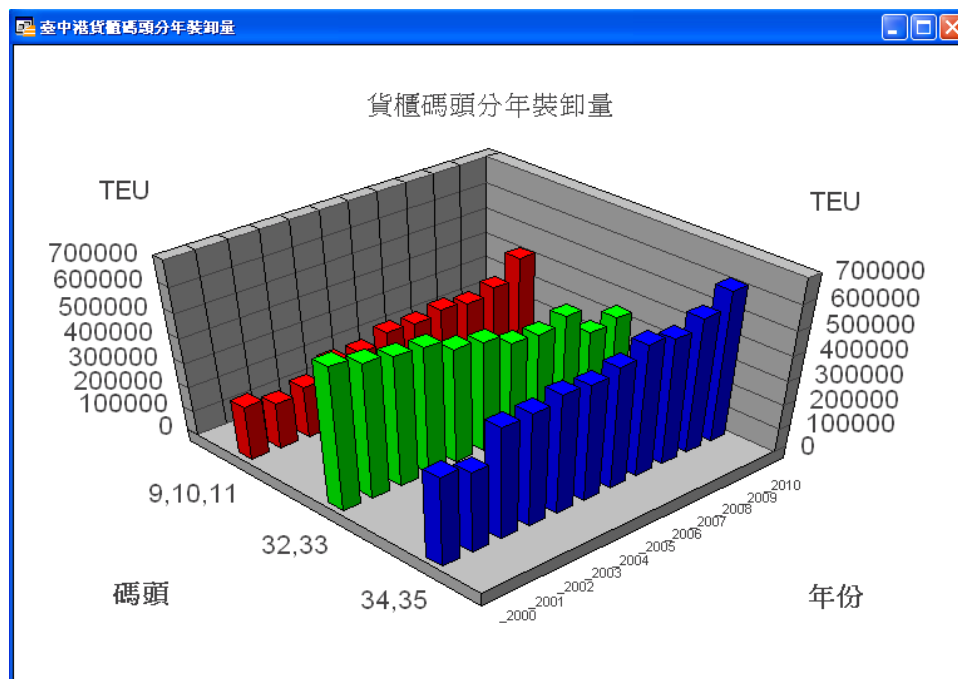


圖 11.9 臺中港全港碼頭貨櫃區裝卸量統計圖展繪

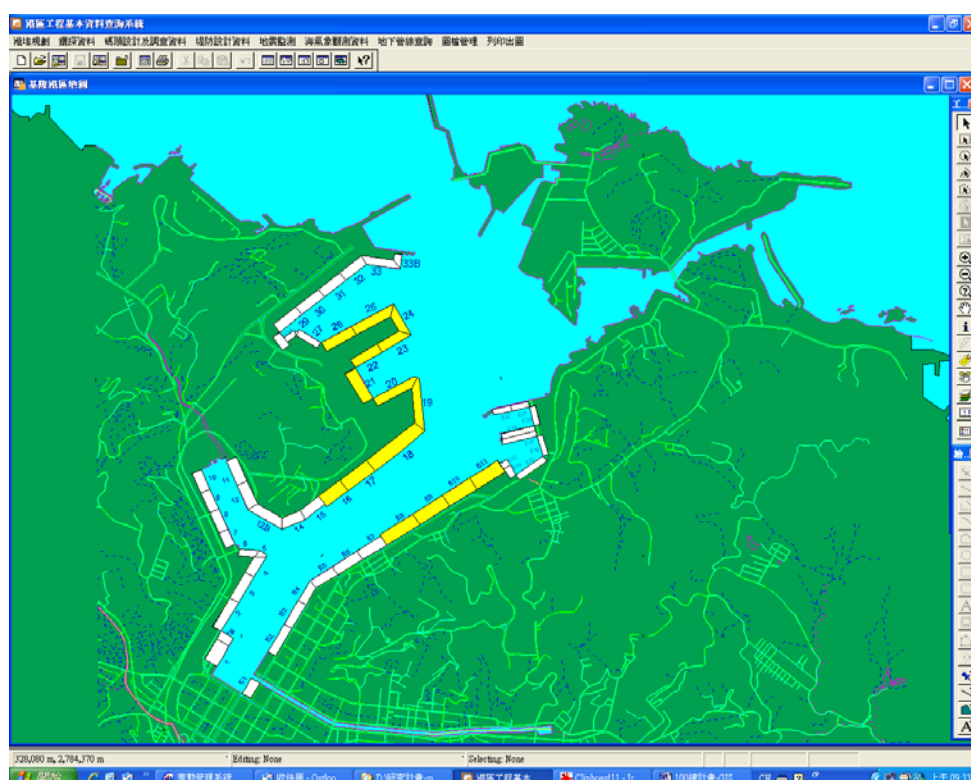


圖 11.10 基隆港貨櫃碼頭分佈位置圖

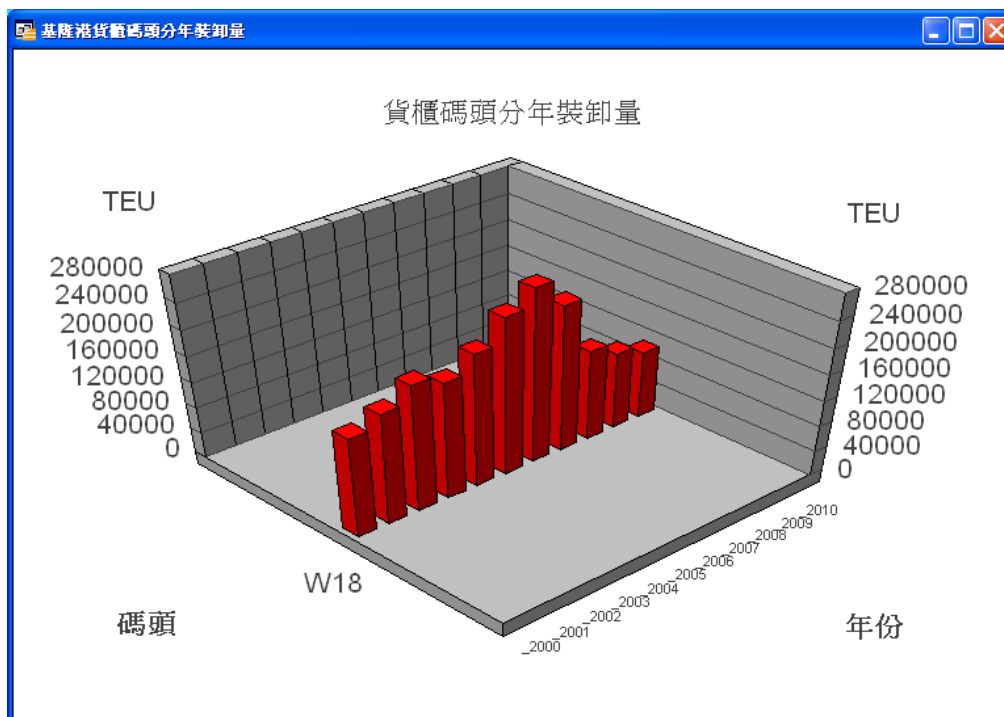


圖 11.11 基隆港單一碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪

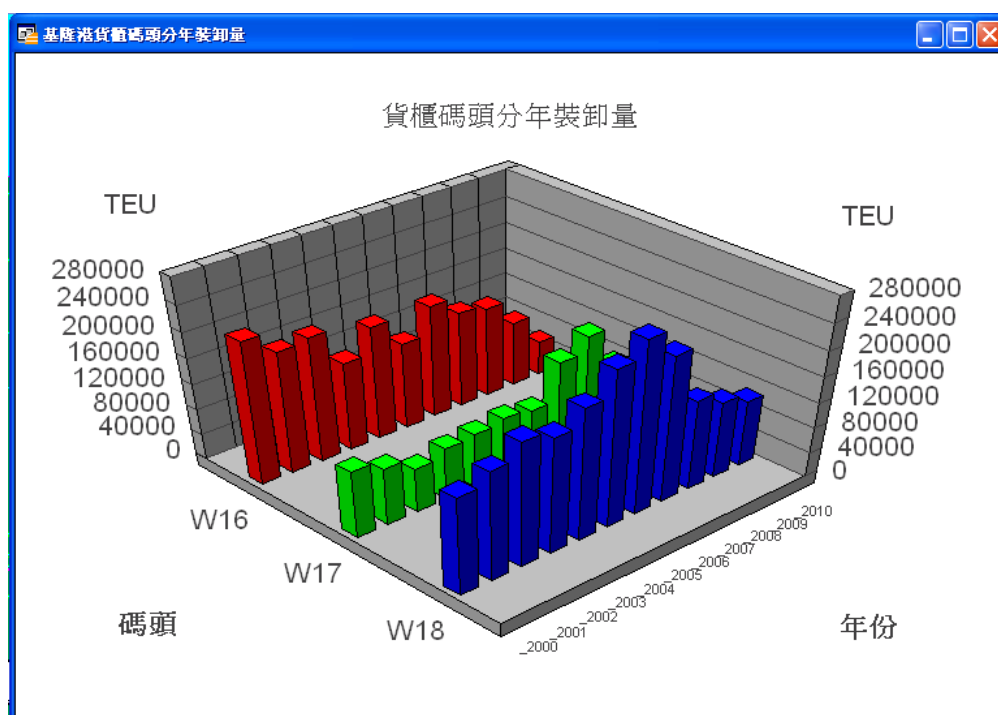


圖 11.12 基隆港多選碼頭貨櫃裝卸量統計圖展繪

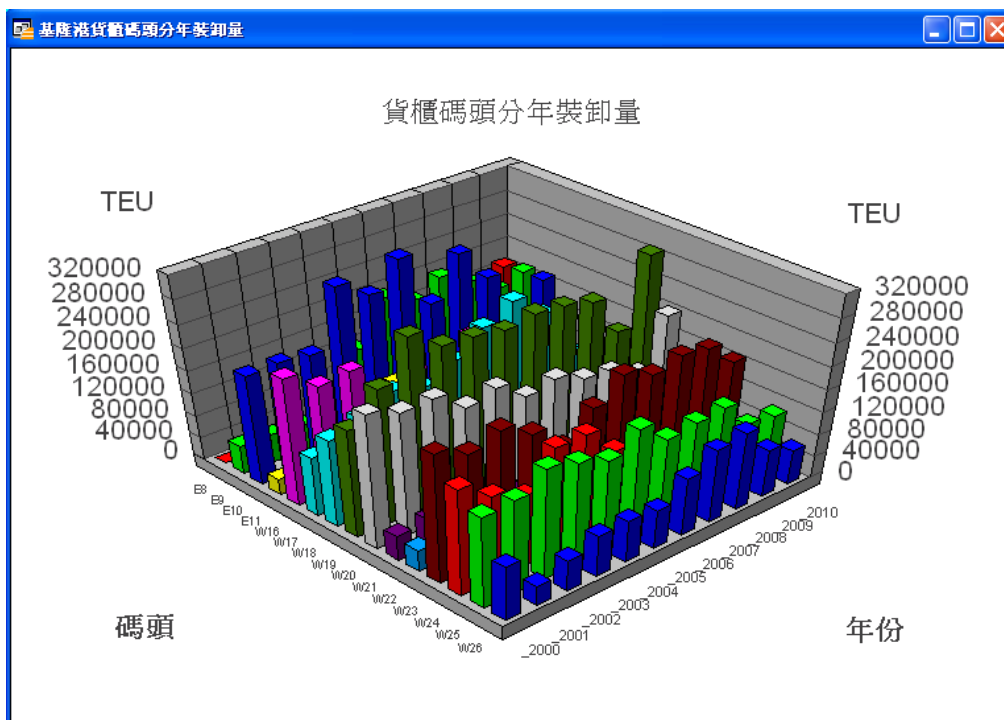


圖 11.13 基隆港全港區貨櫃碼頭裝卸量統計圖展繪

第十二章 海氣象調查資料查詢展示

12.1 海氣象調查資料查詢設計

海氣象調查資料經分析後將產生資料檔、資料圖、報表、統計表及統計圖等有用的資料或資訊，本研究運用 MapInfo 地理資訊系統，將各種檔案鍵入資料庫系統，並撰寫查詢展示程式，提供查詢及引用。為方便系統程式之撰寫及設計，本系統以資料庫表單作為查詢之依據，表單之格式及部分登錄內容如表 12-1 所示，其中較特殊的欄位，如表單第 7 欄「點區」係為區分觀測範圍為單點或平面，第 8 欄「碼 1」代表測站編號，第 9 欄「碼 2」代表不同圖表。

表 12-1 資料庫表單之格式及登錄內容

序號	方法	港區	類別	年份	月季	點區	碼 1	碼 2	X 座標	Y 座標	檔圖表說明	目錄	全檔名	副檔名	內 容
1	現場	臺北港	波浪	2000	6 月	點	1	1	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V006TP11.pdf	pdf	波高與週期月報表
2	現場	臺北港	波浪	2000	6 月	點	1	7	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V006TP17.pdf	pdf	波高與波向月報表
3	現場	臺北港	波浪	2000	7 月	點	1	1	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V008TP11.pdf	pdf	波高與週期月報表
4	現場	臺北港	波浪	2000	7 月	點	1	7	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V008TP17.pdf	pdf	波高與波向月報表
5	現場	臺北港	波浪	2000	8 月	點	1	1	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V008TP11.pdf	pdf	波高與週期月報表
6	現場	臺北港	波浪	2000	8 月	點	1	7	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V008TP17.pdf	pdf	波高與波向月報表
7	現場	臺北港	波浪	2000	9 月	點	1	1	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V009TP11.pdf	pdf	波高與週期月報表
8	現場	臺北港	波浪	2000	9 月	點	1	7	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V009TP17.pdf	pdf	波高與波向月報表
9	現場	臺北港	波浪	2000	10 月	點	1	1	287,042	2,786,156	表	GisF1\TP\V1\	V011TP11.pdf	pdf	波高與週期月報表

現場觀測海氣象資料圖表查詢系統流程如圖 12.1 所示，查詢項目包括有風力、波浪、潮汐及海流等 4 項。進入系統，主畫面即顯示臺灣地圖及標示所有港區位置，以滑鼠選一港區，則背景顯示港區詳細地圖及標示所有測點位置，以滑鼠選一測點，則列出下拉式標題：(1)潮汐、(2)海流、(3)風力、(4)波浪，以滑鼠點選任一主項目，接著再進入下一層點選子項目。查詢內容除重要的統計圖或統計表，各觀測站或觀測區，皆有測站(區)位置、儀器安置、記錄期間等說明。

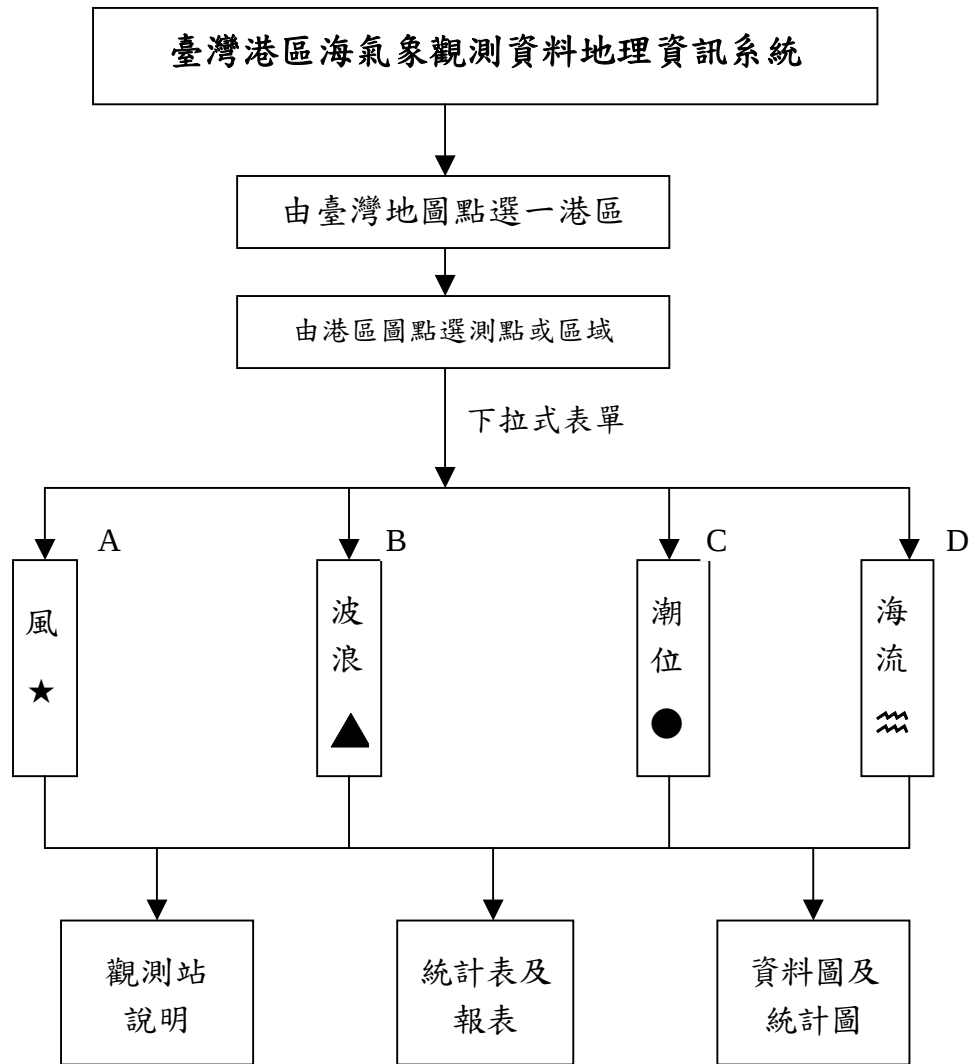


圖 12.1 臺灣港區海氣象觀測資料地理資訊系統流程圖

12.2 查詢選單與檔案關聯說明

查詢選單與目的檔案之關聯，係依據檔案類型由系統呼叫不同的執行程式來開啟。檔案之類型都紀錄在資料庫表單內。海氣象查詢選單依調查資料目前分為四大類，即：1)潮汐、2)海流、3)風力、4)波浪。每一類之內容都涵蓋數種統計圖表及說明文件，各類資料內容、檔案類型與其查詢過程之關聯如下所示：

1)潮汐資料:內容 → 查詢過程 → 檔案類型:

潮位測站說明:	→ PS 檔(例 TIM1TC40.PS)
潮位觀測記錄表	→ PS 檔(例 T971TC40.PS)
潮汐統計表	→ PS 檔(例 T970TC42.PS)
潮汐調和常數表	→ PS 檔(例 T970TC43.PS)
潮汐分潮振幅值圖	→ PS 檔(例 T970TC4K.PS)
潮汐資料	→選年→選月→ASC 檔(例 T971TC40.1HE)
潮汐月報表	→選年→選月→PS 檔(例 T971TC41.PS)
潮汐月歷線圖	→選年→選月→PS 檔(例 T971TC4I.PS)
潮汐能譜圖	→選年→選月→PS 檔(例 T971TC4J.PS)

2)海流資料:內容 → 查詢過程 → 檔案類型:

海流測站說明:	→ PS 檔(例 CIM1TC40.PS)
海流觀測記錄表	→ PS 檔(例 C971TC40.PS)
海流統計表	→ PS 檔(例 C970TC45.PS)
潮流調和常數表	→ PS 檔(例 C970TC46.PS)
分潮流長短軸值圖	→ PS 檔(例 C970TC4N.PS)
海流資料	→選年→選月→ASC 檔(例 C971TC40.1HE)
海流月報表	→選年→選月→PS 檔(例 C971TC41.PS)
流速及流向聯合分佈	→選年→選月→PS 檔(例 C971TC42.PS)
海流月資料圖	→選年→選月→PS 檔(例 C971TC4I.PS)
海流玫瑰圖	→選年→選月→PS 檔(例 C971TC4J.PS)
潮流橢圓圖	→選年→選月→PS 檔(例 C971TC4K.PS)
海流能譜圖	→選年→選月→PS 檔(例 C971TC4L.PS)
海流 PVD 圖	→選年→選月→PS 檔(例 C971TC4M.PS)

3)風力資料:內容 → 查詢過程 → 檔案類型:

風測站說明:	→ PS 檔(例 WIM1TC40.PS)
風觀測記錄表	→ PS 檔(例 W971TC40.PS)
風統計表	→ PS 檔(例 W970TC45.PS)
風資料	→選年→選月→ASC 檔(例 W971TC40.1HE)
風月報表	→選年→選月→PS 檔(例 W971TC41.PS)
風速及風向聯合分佈	→選年→選月→PS 檔(例 W971TC42.PS)
風月資料圖	→選年→選月→PS 檔(例 W971TC4I.PS)
風玫瑰圖	→選年→選月→PS 檔(例 W971TC4J.PS)

4)波浪資料：內容 → 查詢過程 → 檔案類型：

波浪測站說明：	→ PS 檔(例 VIM1TC40.PS)
波浪觀測記錄表	→ PS 檔(例 V971TC40.PS)
波浪統計表	→ PS 檔(例 V970TC45.PS)
波浪資料	→選年→選月→ASC 檔(例 V971TC40.1HE)
波浪月報表	→選年→選月→ PS 檔(例 V971TC41.PS)
波高及週期聯合分佈	→選年→選月→ PS 檔(例 V971TC42.PS)
波浪資料圖	→選年→選月→ PS 檔(例 V971TC4I.PS)
波浪方塊圖	→選年→選月→ PS 檔(例 V971TC4J.PS)
波浪玫瑰圖	→選年→選月→ PS 檔(例 V971TC4K.PS)

12.3 系統操作程序

本中心所開發的「港區工程基本資料查詢系統」內第六個主選單即為「海氣象現地調查」選單，使用者可在此選單下查詢各類海氣象現地調查資料，系統操作程序如下所示：

1. 在視窗作業環境下，執行MapInfo系統，進入該系統內。
2. 點選功能表File\Run MapBasic Program，選擇d:\harbor-1內的執行檔harbor.mbx，按OK選鈕，即進入港區工程基本資料查詢系統。
3. 此時螢幕會展繪出臺灣全島地圖，並標示基隆、臺北、臺中、高雄、花蓮、蘇澳等港區的分佈位置。
4. 利用滑鼠，點選其中任一港區，則螢幕展繪出該港區的向量地圖，地圖以綠色標示陸面區域位置，以水藍色標示海面區域位置。此時可點選「海氣象現地調查」主選單下之第一選項「潮位測站顯示」，系統則載入該港區之潮位測站位置分佈圖。或是點選第七選項「流測站顯示」，系統則載入該港區之流測站位置分佈圖。其他測站也可依此方式顯示。當所叫用的測站位置圖顯示在螢幕上時，該功能表底下所附屬的測站關閉功能項，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。
5. 利用工具箱內的放大、縮小、平移等工具，可作地圖縮放，以更精

細地查詢目標位置及鄰近地形。

6. 選用工具箱內的點選工具，再點選所欲查詢之物件。當所點選的物件為測站位置時，系統即進入資料庫表單搜尋該測站之內容項目，隨後在螢幕上顯示「資料內容選取對話框」，對話框內展列該測站所登錄的所有內容項目，使用者可選取需用項目。
7. 選取完需用項目後，系統即進入資料庫表單搜尋該項目之登錄年份，隨後在螢幕上顯示「年份選取對話框」，對話框內展列該測站所登錄的所有年份，使用者可依需用選取。
8. 選取完目標年份後，系統即進入資料庫表單搜尋該年份之登錄月季，隨後在螢幕上顯示「月季選取對話框」，對話框內展列該測站所登錄的所有月季，使用者可依需用選取。
9. 選取完目標月季後，系統即進入資料庫表單搜尋該月季之資料檔案，隨後在螢幕上顯示查詢結果。
10. 使用者可依循步驟6至9，繼續查詢其他資料內容。
11. 若要查詢另一港區的碼頭資料，可點選第一主選單「港埠規劃」下的倒數第二選項「選擇港區」，則系統會跳回主畫面顯示港區位置分佈圖。再依循步驟4至11，可繼續查詢所需港區之相關資料。
12. 結束查詢，可在功能表的第一個主選單「港埠規劃」下，拉出最後一個選項「離開系統」，點選後則可停止本程式的執行。

12.4 高雄港海氣象調查資料查詢展示

高雄港海氣象調查資料查詢展示系統操作程序如下所示：

1. 按照8.3節程式操作程序1至3，使用者可進入查詢系統的主畫面，此時螢幕視窗會展繪出臺灣全島地圖與主要港區（如基隆、臺北、臺中、高雄、花蓮、蘇澳等港區）的分佈位置，如圖3.3所示。
2. 將滑鼠遊標移至高雄港標示文字區內，按滑鼠左鍵，可叫出高雄港區基本地圖圖層，地圖以綠色標示陸面區域位置，以水藍色標示海

面區域位置。此時可點選「海氣象現地調查」主功能項下之第一選單「潮位測站顯示」，系統則載入該港區之潮位測站位置分佈圖。或是點選第七選單「流測站顯示」，系統則載入該港區之流測站位置分佈圖。其他測站也可依此方式顯示。當所叫用的測站位置圖顯示在螢幕上時，該功能表底下所附屬的測站關閉功能項，會由啟始的無效狀態轉變為有效狀態。高雄港區海氣象查詢表單下拉及潮位測站位置展示如圖12.2所示。

3. 選用工具箱內的點選工具，再點選所欲查詢之物件。當所點選的物件為測站位置時，系統即進入資料庫表單搜尋該測站之內容項目，隨後在螢幕上顯示「資料內容選取對話框」如圖12.3，對話框內展列該測站所登錄的所有內容項目，使用者可選取需用項目。
4. 選取完需用項目後，系統即進入資料庫表單搜尋該項目之登錄年份，隨後在螢幕上顯示「年份選取對話框」如圖12.4，對話框內展列該測站所登錄的所有年份，使用者可依需用選取。
5. 選取完目標年份後，系統即進入資料庫表單搜尋該年份之登錄月季，隨後在螢幕上顯示「月季選取對話框」如圖12.5，對話框內展列該測站所登錄的所有月季，使用者可依需用選取。
6. 選取完目標月季後，系統即進入資料庫表單搜尋該月季之資料檔案，隨後在螢幕上顯示查詢結果，圖12.6為高雄港潮位資料圖查詢結果之一。
7. 使用者可依循步驟3至6，繼續查詢其他資料內容。如圖12.7為高雄港海流資料圖查詢結果之一。
8. 若要查詢另一港區的碼頭資料，可點選第一主選單「港埠規劃」下的倒數第二選項「選擇港區」，則系統會跳回主畫面顯示港區位置分佈圖。再依循步驟4至11，可繼續查詢所需港區之相關資料。
9. 結束查詢，可在功能表的第一個主選單「港埠規劃」下，拉出最後一個選項「離開系統」，點選後則可停止本程式的執行。

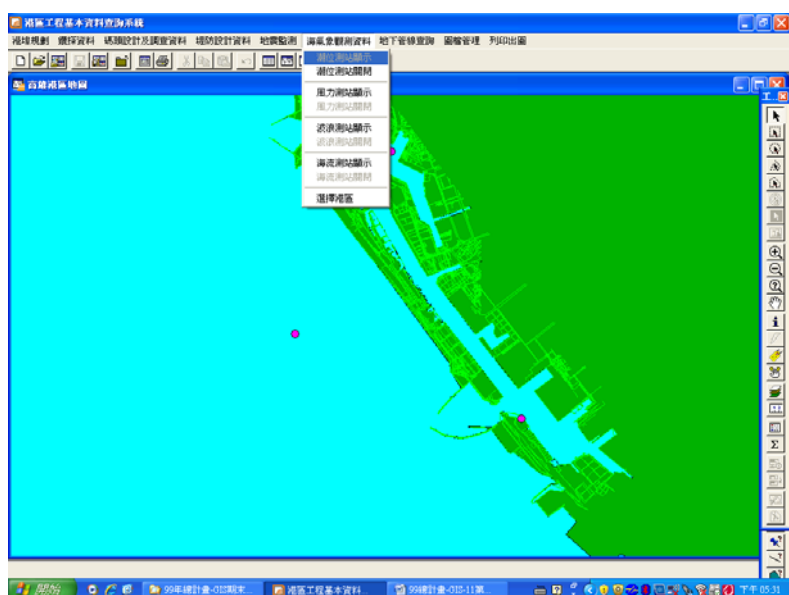


圖 12.2 高雄港區海氣象查詢表單及潮位測站位置展示圖

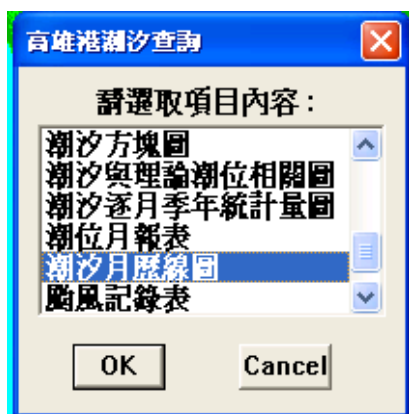


圖 12.3 高雄港潮位資料內容選取對話框



圖 12.4 高雄港潮位資料年份選取對話框

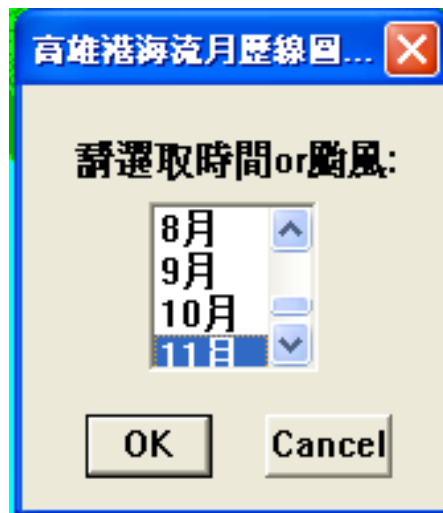


圖 12.5 高雄港潮位資料月季選取對話框

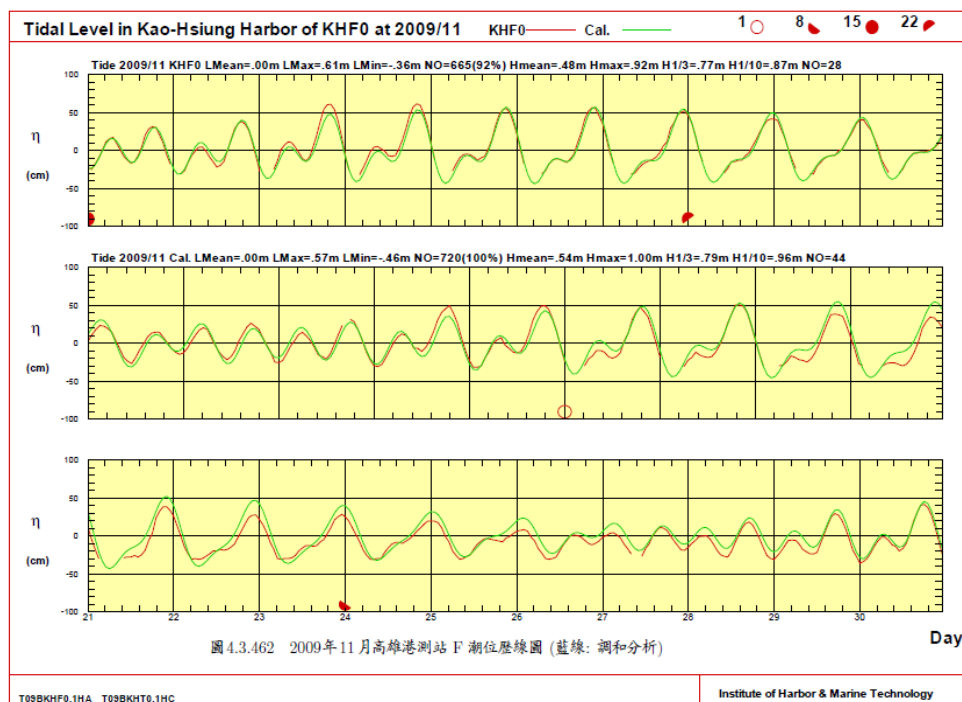


圖 12.6 高雄港潮位資料圖查詢結果之一

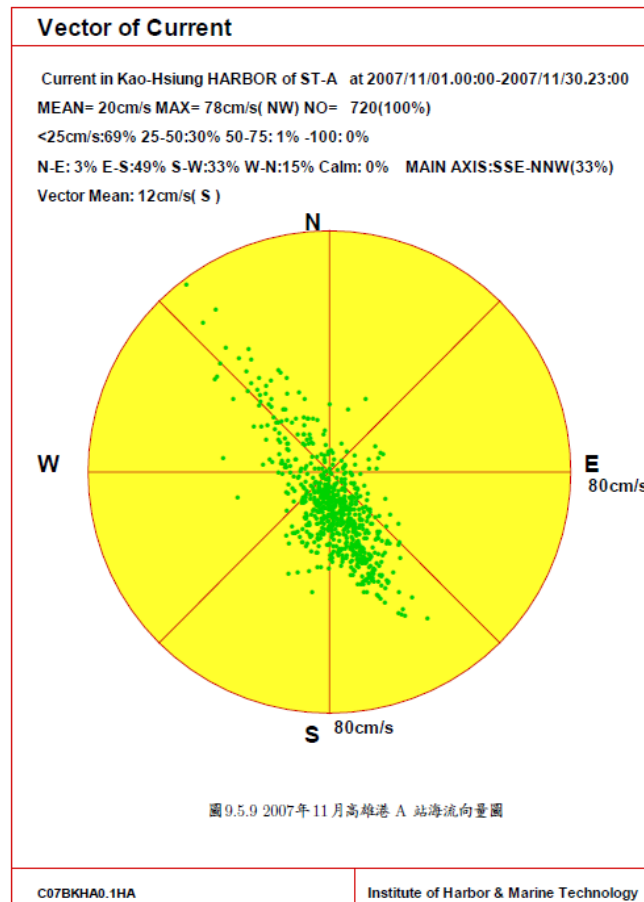


圖 12.7 高雄港海流資料圖查詢結果之一

第十三章 港區防救災資料庫系統建置與更新

前期研究「港區防救災體系建置之研究」已整合完成五個港之防救災資料庫系統，本計畫第一年度之研究，借助過往經驗進行高雄港務局安平港分局之防救災資料庫系統之開發。主要著重在改善系統效能、整合臺中港務消防隊防救系統與 4D（災害三度空間＋時間）網路地理資訊系統技術的運用。

13.1 強化 4D 展現功能

系統功能將透過 Google Earth 以 4D 的方式呈現災害歷程，將原本單一影像資料以動畫的方式，搭配災害時間的推移，於空間資訊上展現災害歷程(如圖 13.1)。



圖 13.1 以 Google Earth 時間軸展現災情隨時間變化的情形

13.2 系統效能改善

根據前期計畫執行成果與使用者經驗回饋，反應系統空間資訊展現效能較差之問題，以下就系統效能改善策略、防救災資料庫系統功能規劃等各項內容進行說明。

13.2.1 以雲端主機改善系統效能

以雲端主機概念建構港區災害防救資料庫系統。以往資訊公司在建置資訊系統時，均需對系統環境進行微調，此微調包含電腦硬體規格及相對應之作業系統。在電腦硬體價格普遍低廉的趨勢下，一台標準伺服器所能提供的效能均高於系統所需求之水準，一台伺服器僅配置一套系統已不符合現況，加上目前網路環境與資源相對充足，雲端主機的概念應運而生。

所謂的雲端主機是一虛擬主機的概念並配合雲端的環境而成，虛擬主機是一種軟體技術，此技術是以軟體模擬硬體環境，使用者可根據需求調整環境的資源並安裝作業系統。目前硬體設備價格並不高，在一般的主機上切割出數個虛擬空間同時進行操作，效能表現也可令人滿意，硬體的使用效益也可達最大化，雲端主機具備了下列幾項優點：

1. 成本低廉

根據不同硬體等級區分，一部伺服器可切割出數個或數十個虛擬主機，較以往一機一系統比較，成本相對降低許多。

2. 管理方便

所有的虛擬系統均在同一台主機上，當管理者進行調整時不需切換到其它主機，目前虛擬主機軟體均有管理介面提供使用者進行管理。

3. 環境具彈性

虛擬主機可根據使用者需求建構出不同的作業環境，不論是 Windows 或 Linux 均可輕鬆建立。

4. 系統重建快速

所有的虛擬主機在實體上均為數個檔案構成，當主機毀損需要將系統移植至其它地方時，只需要將檔案拷貝至新主機即可完成移植，配合目前儲存設備的備份系統，虛擬主機甚至不會有任何毀損即可迅速正常作業。

5. 系統轉移快速

以往系統移植必須事先建立適合的作業系統與環境，此項作業均需花費不少時間與金錢，而虛擬主機可在任何一台電腦上建立所需環境，不需再針對系統花費大量成本，大大降低系統移轉的負擔。

13.2.2 使用雲端主機之效益與風險

港區防救災資料庫系統開發至今已趨穩定，目前系統所需要的是快速穩定的網路，而硬體需求只需要一般伺服器規格即可，目前 Hinet 所提供「HiCloud 雲端主機」服務正可滿足此需求，評估後，已將系統移植至 HiCloud 雲端主機。

在相對於依賴網路的環境下，必須同時考量資訊系統使用的便利性與資訊安全，就系統的效益與風險說明如下。

1. 使用雲端主機之效益

(1) 降低管理成本

不須購置資訊設備，相對應管理資訊設備之硬體環境也由雲端主機商提供，有專人確認機房網路、主機、空調等設備是否運作正常。管理者能在任何有網路服務的場所連上 HiCloud 主機，進行系統調整或修改，可有效避免其它因素造成無法連線至主機的情況。

(2) 快速部屬及擴充系統

目前各港區之資訊均放置於同一台主機，未來可根據需求進行分割，配合雲端主机的特性可快速建立專屬於各港區之系統，當系統進行技術移轉時，可直接進行系統交接，不需再為系統添購相對應的硬體設備。

2. 使用雲端主機可能面對之風險

(1) 網路速率及穩定性

雲端主機為多人共用頻寬的網路環境，相對於 ADSL 或光纖上網，必須注意每個單位能夠分配到的頻寬大小，若有使用較大頻寬的需求，就得衡量是否要切換線路。

除此之外，可採用非相同 ISP(Internet Service Provider, 網路服務供應商)業者線路做為備原，以應付原本 ISP 需要停機或維修。一般以穩定性而言，固定制的寬頻網路較 Cable 上網穩定，且優於行動上網。

(2) 安全性的風險

雲端主機必須將資料放置於遠端，雖然能透過軟體的方式進行防火牆設定與資料加密，但硬體設備的管理權仍在雲端主機商，依然有資訊安全風險的存在。

3. 資訊安全措施

無論是否使用雲端主機，都可能面對資訊安全之風險，因此在適當的成本考量下，盡量提高資訊安全的程度。本系統於雲端主機上之應用，包含網頁服務發佈、地圖服務發佈、資料庫及防救災相關 PDF 文件。對於港務局而言，若涉及敏感資料，則可針對資料項進行模組拆解，將具敏感之資料放置於港務局內部。

13.2.3 以雲端系統建構之防救災資料庫系統架構

為實現雲端架構來解決系統效用之問題，必須將原本系統拆解，以服務的方式將系統進行配置與重組(如圖 13.2)，包含多媒體簡訊服務(MMS Server)、語音服務(VOIP Server)、地圖服務(Map Server)、空間資訊服務(MapGuide Open Source) 與防救災資料庫系統(Web Server)。此架構已於計畫初期完成，後續進行的臺北港金華演習、臺中港海嘯應變演習、成果宣導等皆於此平台上進行實機操作與測試。

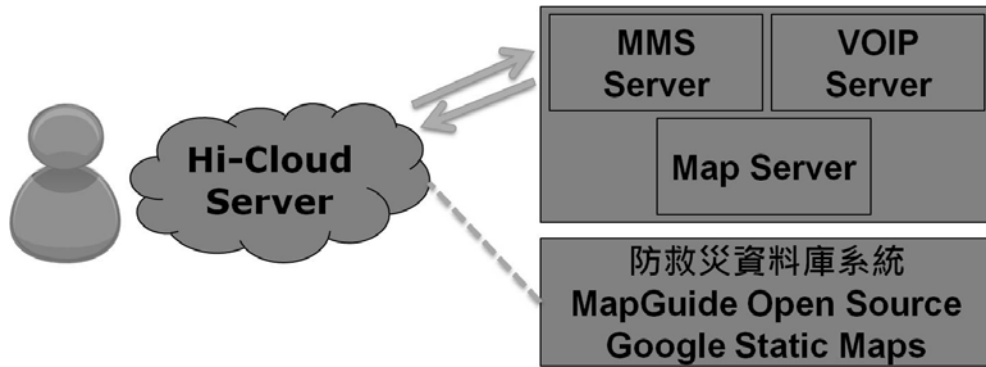


圖 13.2 系統服務配置圖

上述服務，分別規劃 Hinet 雲端機房主機與防救災功能服務主機進行系統重整(如圖 13.3)，雲端機房的部分包含網頁伺服器與空間資訊服務，使用其優勢的網路環境加速使用者對於空間資訊的存取，與穩定的設備管理環境維持系統運作正常。防救災功能服務主機則包含簡訊服務、地圖服務和語音服務，以實體伺服器的方式進行各項服務供應。

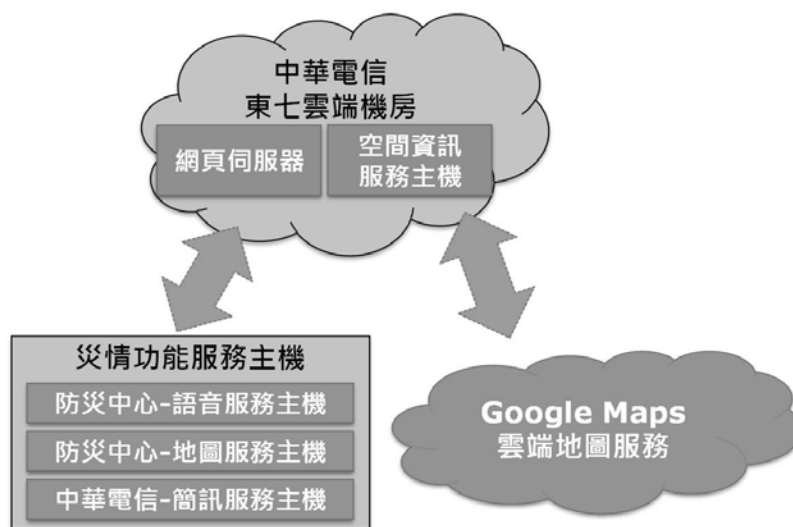


圖 13.3 系統設備架構圖

13.3 安平港資料庫系統功能需求

本研究針對防救災資料庫系統功能之需求，依據前期計畫執行結果，得到以下功能需求目標：

1. 採多方位災情通報流程

由訪談結果分析顯示，主要通報方式為室內電話及行動電話為主，但往往人、事、時、地、物等資訊無法在室內電話及行動電話中完全展現出來，因此採用多方位災情通報方式(圖 13.4)，如多媒體簡訊、自動語音電話、網路自動傳真，配合手持裝置的使用，可有效提升災情通報的精度、時效與品質。



圖 13.4 本研究建議之多方位災情通報流程

2. 需具有時、空資訊展整合示能力

系統整合港務局既有 CCTV、船舶動態等即時資訊，同時以地理資訊平台展現空間資訊、即時資訊、防救資資訊、災害潛勢資訊，在災情輸入方面可用空間點選進行輸入，亦可納入災害防救相關鏈結。

3. 防救災資源資料維護簡單化

具有整批防救災資源資料維護能力，讓港務局人員以檔案抽換方式簡易維護港區內之防救災資源資料。

4. 定位為各港既有系統之輔助系統

目前各港皆有自己的作業流程配合相關系統執行防救災業

務，但往往面臨空間展示能力不足、彼此系統未整合等問題。因此本整合系統應定位為各港之輔助系統，藉此可補足各港既有系統之不足處，達到相輔相成的效果，提升使用意願。

13.4 安平港防救災資料庫系統架構

防救災資料庫系統架構之內容依軟硬體架構、使用者、系統功能架構等三部份進行說明。

1. 軟、硬體架構

根據以上需求，防救災資料庫系統之軟、硬體架構(如圖 13.5)共包含包括系統端、資料庫端、使用者端三部份：

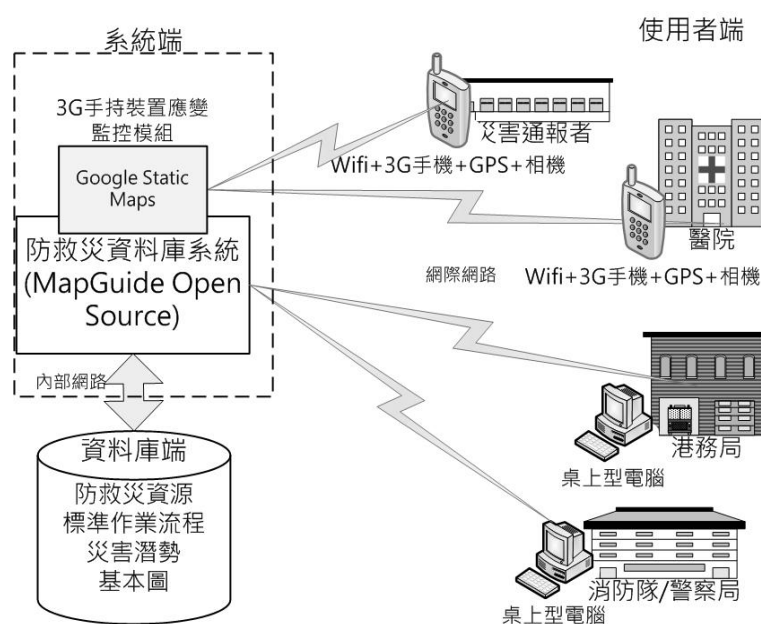


圖 13.5 防救災資料庫系統軟硬體架構圖

(1) 系統端

系統端是輔助決策支援系統的核心，透過 MGOS 網際網路地理資訊系統，提供使用者查詢資料庫之空間圖資，並於 3G 手持裝置應變模組中藉由 Google Static Maps 自動提供使用者於所需的圖資。

(2)使用者端

使用者透過網際網路進入本系統取得輔助決策之資源，而本系統規劃包括港務局、港務消防隊、港務警察局、港區廠商、與醫院等使用者可利用 3G 手持裝置或電腦上網進入本系統進行各項防救災業務操作。

(3)資料庫端

資料庫為本系統之所有查詢與分析所需資訊之主要來源，而資料庫內容包括防救災資源、標準作業流程、災害潛勢、基本圖等。

此系統規劃以一台伺服器主機，提供網路伺服服務、地理資訊系統伺服服務及資料庫伺服服務，彼此透過內部應用程式及地理資訊系統進行連結，此伺服器建議放置於港灣中心資訊室，透過內部權限控管，進行安全管制，資料庫與地理資訊系統部分考量港灣中心之經費與未來規劃配置使用 Google Map 及開放源碼資料庫進行系統之開發。

2. 使用者

系統之使用者規劃包含三個部份，系統管理員、一般使用者及應變中心指揮官，依權限不同，有限制的進行各項功能操作。

(1)系統管理者

系統管理者的功能權限可進行帳號之啟用管理工作，針對系統之使用者帳戶可進行啟用與停止的工作。

(2)一般使用者

為本系統最主要之使用者，通常為應變小組的成員，也是輸入災情資訊最主要的人員。它可以執行災情登錄、災情維護與災情發布等功能。

第十四章 既有防救災系統整合應用演練測試

本年度計畫開始之初，分別前往臺北港分局和臺中港務局進行了解，得知臺北港分局舉辦今年度由行政院主導跨部會之金華演習，透過數次的拜訪與討論，由本系統代表運輸研究所港灣技術研究中心參與金華演習，提供港區災情傳遞、毒化災害範圍模擬與港區相關空間資訊之協助。

臺中港務局參與行政院海岸巡防署海洋巡防總局第三海巡隊所主辦之 100 年度中區海嘯應變演練暨港口保全演練，本研究代表交通部運輸研究所港灣技術研究中心為參演單位，擔任港區災情傳遞與海嘯災害模擬之角色。期間，臺中港務消防隊提供救災系統，與本研究之成果進行界接與整合。

14.1 臺中港務消防隊救災系統整合

14.1.1 臺中港務消防隊之「救災系統」之現況

臺中港務消防隊之「救災系統」以救援車輛之勤務派遣、救援車輛位置監控、災情影像回傳管理功能為主(如圖 14.1)，目前臺中港務消防隊擁有四套隨車影像系統和四套行動影像系統，可將救災資訊即時傳回指揮中心，配合消防無線電頻道，使得指揮官更能了解實際災情狀況，輔助研判與決策。指揮中心更能透過遠端電腦遙控隨車影像鏡頭，進行 360 度的方向調整，透過一應用程式介面，輸出影像資訊或進行歷史查詢，並記錄事件期間消防車的路徑軌跡圖。



圖 14.1 臺中港務消防隊之「救災系統」畫面

同時臺中港務消防隊另以 Google KML 格式，自行建置轄區內防救災資源、港區內公司危險品等空間資訊(圖 14.2)。

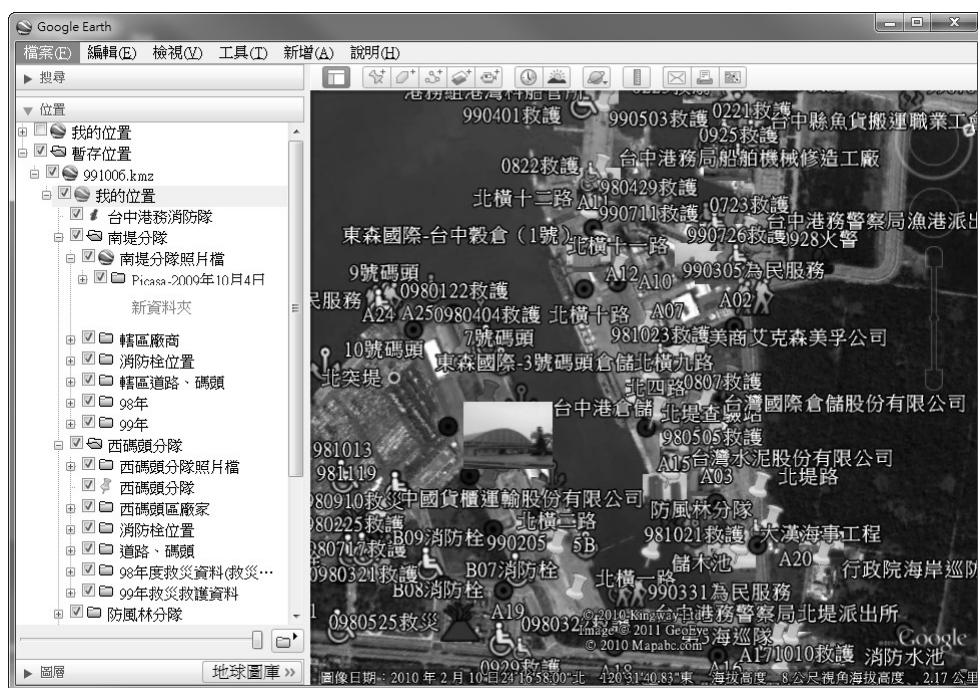


圖 14.2 臺中港港務消防隊建立之 KML 空間資訊畫面

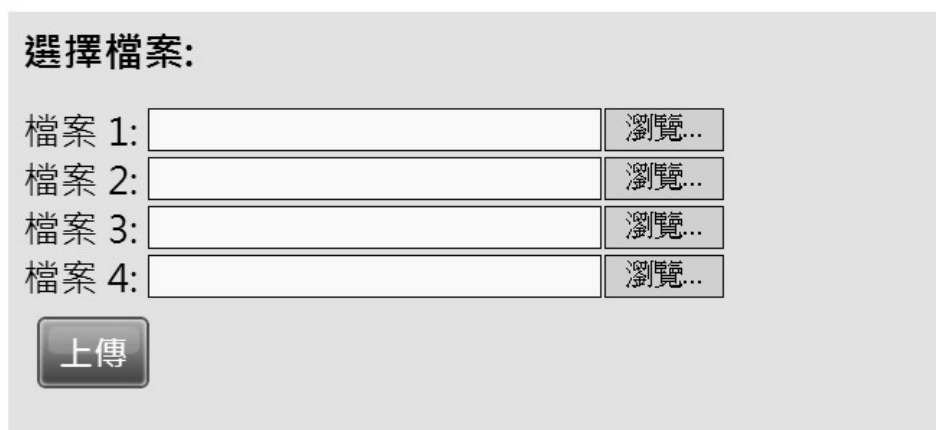
14.1.2 救災車輛即時影音傳輸流程

臺中港務消防隊於2010年3月建置救災車輛即時現地影像傳輸單機系統，此系統可將錄影設備設置於防救災車輛上，進行即時錄影並傳輸影像至主控台，透過系統可將影像檔案輸出成 AVI 檔，消防隊員於災後將影片放置網路上提供查看。

為與本計畫之網路防救災資料庫系統進行整合，需將救災車輛即時影片傳輸至本系統中，因此本計畫規劃救災車輛即時影片傳輸方式，以達即時資訊整合之目的。

目前防救災影像放置的方式為一般網頁瀏覽，為了增加其互動性及便利性，本計畫使用自行設計之影音平台作為使用平台（圖 14.3），供消防隊應變中心人員將即時影片上傳。考慮到消防隊員使用便利性之重點，此系統以便利使用為主，單一上傳介面可避免使用者產生操作障礙，當使用者上傳影片後可至港區防救災系統觀看上傳之檔案，並配對災害與上傳之影片，給予名稱、時間、災害類型等屬性資料。

即時災情影音上傳頁面



The screenshot displays a web-based interface for uploading video files. At the top, the text '選擇檔案:' (Select files:) is followed by four rows, each labeled '檔案 1:' through '檔案 4:'. Each row contains a text input field and a '瀏覽...' (Browse...) button to its right. Below these fields is a large '上傳' (Upload) button.

圖 14.3 影音平台上傳介面

當港務局消防隊員駕駛配置即時現地影像傳輸系統的車輛至防救災現場時，系統會即時回傳現場實況影像至系統伺服器，伺服器接收信號後會將影像顯示至螢幕或投影布幕上並將內容儲存成 PMF 格式

的檔案，使用者可透過系統提供之功能將 PMF 檔案轉檔成 AVI 影音格式。

AVI 檔為一般通用的影音檔，大部份電腦均可播放，使用者可將此檔案上傳至影音平台供使用者觀看並儲存其資訊，而本計畫將納入影音連結的網頁於 KML 或 KMZ 檔中，為地理資訊系統添加更多元的即時災情影片資訊。圖 14.4 為防救災影像資訊處理示意圖。

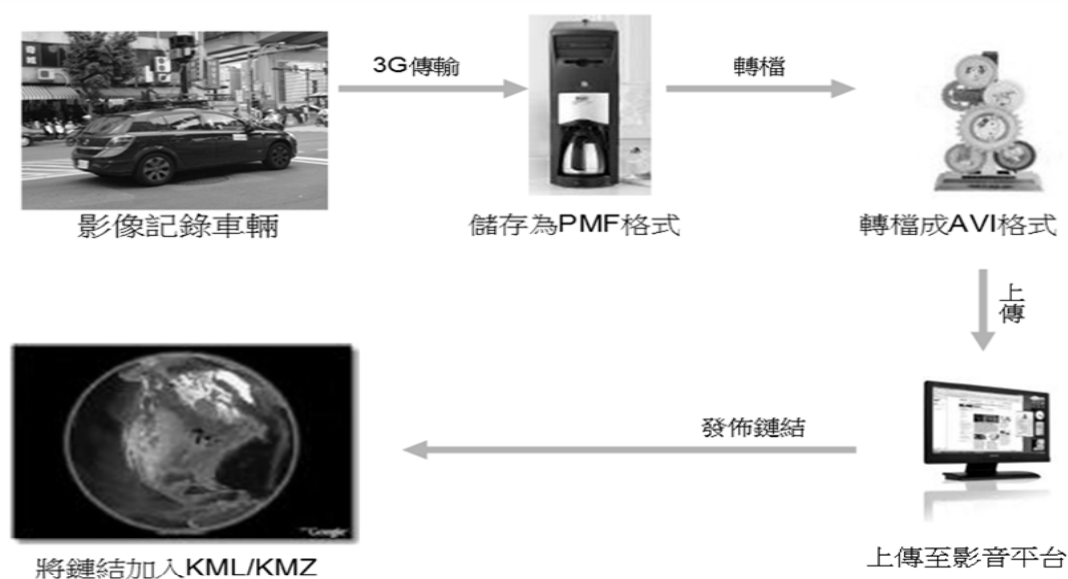


圖 14.4 防救災影像資訊處理示意圖

14.2 即時災情資訊整合規劃

考慮港務人員實際使用之需求與臺中港務消防隊救災系統，規劃增強即時災情資訊與空間資訊之連結，讓使用者透過系統更能明瞭港區內所發生之災情與空間資訊。

主要規畫下列整合項目：

1. 災情歷程空間資訊更新
2. 整合式災情通報

3. 動態災情影音連結

4. 港區即時災情 KML 檔案

14.2.1 災情歷程空間資訊更新

當災害發生時，使用者必須於本系統新增「事件」，在特定事件下「新增災害」，並對災害現況進行災況更新，此為單一災害產生的事件。有鑒於日本地震引發海嘯或八八水災造成的土石流所形成的堰塞湖，諸如此類的複合型災害愈趨頻繁，而港區也有複合型災害發生的可能。

港區地處臨海，船舶本身就運載可燃性物質或危險品，各港區依屬性不同有著數量與品類相異的化學品和儲槽，當災害發生時可能誘發其他災害，依據上述概念下修正系統，進行災情歷程資訊之更新。

系統依據不同災害進行災害歷程管理，於空間資訊上更新災害位置，並進行災害描述（如圖 14.5）。

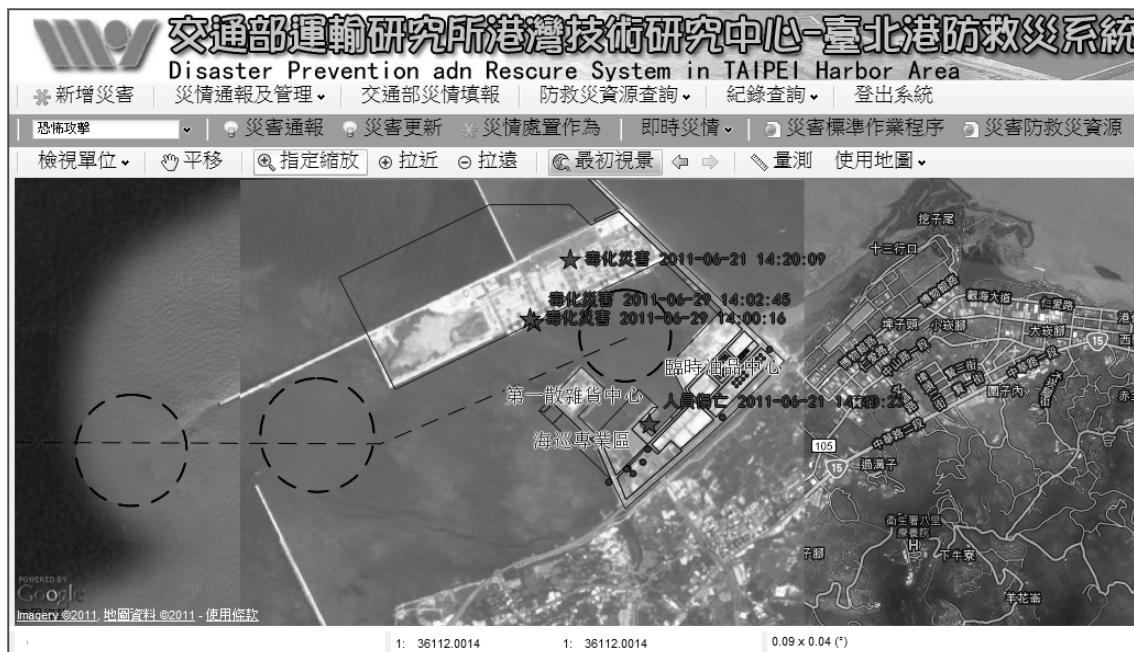


圖 14.5 災害歷程更新系統畫面

14.2.2 整合式災情通報

系統在建置與開發的過程中，加入愈來愈多災情資訊，也依各港區的屬性不同進行調整，身為輔助港區的防救災資料庫系統，必須有效的增加災情通報與災情資訊之連結，今年度將災害與歷程以表列的方式，依事件、災害、時間做排序，提供使用者進行管理，並結合語音通報和簡訊通報，更直覺且便利的進行災情資訊的傳遞（如圖 14.6）。

事件名稱：放射性毒物複合型災害						事件結束歸檔			
2011/6/29 下午 02:00:45發生災害						災害結束 ☐			
災情描述	災害類別	最新狀況	發生時間	災情影音	通報	狀況	修改	刪除	
佈分子安裝於寶山三號定時炸彈引爆，該輪起火燃燒進水傾斜，船艙內尚有1,000 噸「丁二烯」，輻射物及燃油開始外洩，引發大規模爆炸災害，造成10餘名員警及船員傷亡，指揮官指示現場所有人員緊急撤離，並進行輻射安全檢測，除污清洗	毒化災害	警戒處理作業	2011/6/21 14:38:4	瀏覽	通報	新增	編輯	刪除	
寶山三號船長指示船員關閉船舶通往港區儲槽控制閥後撤離，指揮官指示基隆港務消防隊臺北港消防分隊於「寶山三號」上風處，架設無人操作遙控式砲塔灑水系統，作大量水	毒化災害	可燃液體災害搶修作業	2011/6/21 14:16:41	瀏覽	通報	新增	編輯	刪除	

圖 14.6 整合式災情通報系統畫面

14.2.3 動態災情影音連結

本計畫進行影音多媒體災情資訊傳遞模組的開發，使用者僅需持有 3G 手持裝置，透過手持裝置之鏡頭進行影片錄製，再以 3G 上網的方式將影片傳送至系統，使用者即可透過系統針對災情與即時影音進行配對（如圖 14.7），提供多元、即時且符合災況之資訊。

就臺中港港務防隊而言，消防隊應變中心人員，可即時剪輯消防救災車輛即時現地影像，並透過本計畫之多媒體災情資訊傳遞模組上傳即時救災情形，以供指揮官與相關救災決策者參考。

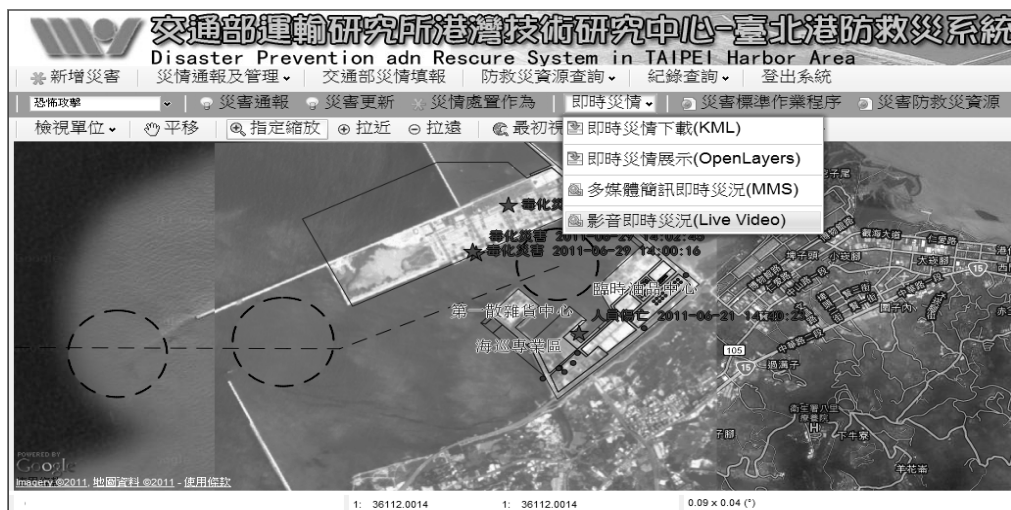


圖 14.7 動態災情影音連結系統畫面

14.2.4 港區即時災情 Google KML 檔案

去年度新增 Google KML 即時災情下載功能，其內容僅包含部分災情資訊，今年度主要透過 Google KML 格式呈現災害位置、災況描述、災情影音資訊隨時間變化歷程之 4 D 空間（災害三度空間＋時間）之資訊展示，強化 Google KML 所提供的災情資訊，使用者於系統內新增的災情資訊，在下載 Google KML 檔案後，可更加結構化的使用 Google Earth 進行災情查詢（如圖 14.8）。



圖 14.8 KML 結構化目錄範例

災害以樹狀結構進行分類，目錄內依災害歷程分為災害發生、災害階段與災害結束，點選各項災害則開啟說明視窗，提供資訊包括災害類別、災害描述、發生時間與影音影片資訊（如圖 14.9）。

災害階段-1



圖 14.9 KML 災情資訊視窗

透過系統下載 KML 檔，會主動與系統進行災情同步與更新，使用者僅需下載一次 KML 檔案，只要有連結網路，即可得知目前港區內災情狀況。

14.3 臺北港金華演習

本次演習包含實兵演練與裝備展示兩部份，實兵演練由系統畫面呈現毒化災害擴散模擬空間資訊展示與災情通報傳遞，裝備展示則陳列可供系統操作之電腦設備與系統畫面，並結合港灣技術研究中心今年度於臺北港港區架設之兩組 CCTV。

下列就參與演習歷程、系統配合之項目與演習現場狀況分別說明。

14.3.1 金華演習參與歷程

於 100 年 3 月份開始接洽臺北港分局，協商演習參與事項，5 月底訂定由港灣技術研究中心協助臺北港分局之演習提供空間資訊相關

之系統畫面，6 月收到交動會函文，正式說明運輸研究所港灣技術研究中心為金華演習參演單位，除配合實兵演練的畫面呈現，另參與裝備展示，共計四次預演和一次正式演習，相關歷程說明如表 14-1。

表 14-1 金華演習參與進度說明

拜訪日期	討論事項
3 月 1 日	得知臺北港舉辦由行政院主導跨部會之金華演習。
4 月 20 日	取得演習腳本初稿，並協調本系統於腳本內之角色定位。演習項目包含恐怖攻擊與毒化災害，針對毒化災害部份由臺北港分局提供之 ALOHA 模擬軟體進行災害範圍計算，並測試與本系統介接之可能。
4 月 28 日	與臺北港分局討論初步結論，由本系統及本計畫團隊擔任臺北港分局防災應變小組，並透過系統進行災情傳遞。
5 月 18 日	依據更新後之腳本內容，本系統以預錄動畫的方式，於腳本內呈現兩段內容，分別為毒化災害範圍擴散空間資訊與災情通報，相關動畫由辦理臺北港本次演習的廠商進行後製剪接。
6 月 8 日	第一次實兵預演，並接獲交通會通知運輸研究所港灣技術研究中心為金華演習正式演出單位，除協調實兵演練部份外，須進行裝備展示。
6 月 14 日	第一次裝備展示預演。
6 月 15 日	第二次實兵預演。
6 月 22 日	第三次實兵預演。 第二次裝備展示預演。
6 月 28 日	第四次實兵預演。 第三次裝備展示預演。
6 月 29 日	正式演習。

14.3.2 毒化物災害應變作為—使用 ALOHA 毒化物境況模擬系統

本此演習共有兩個狀況，分別為關鍵基礎設施(商港)遭恐怖攻擊應變作為及情資通報與放射性及毒化物附合型災變應變作為，原本系統在設計上就有考慮港區內的各類危險品、化學品和儲槽可能造成的火災或爆炸災害（如圖 14.10）。

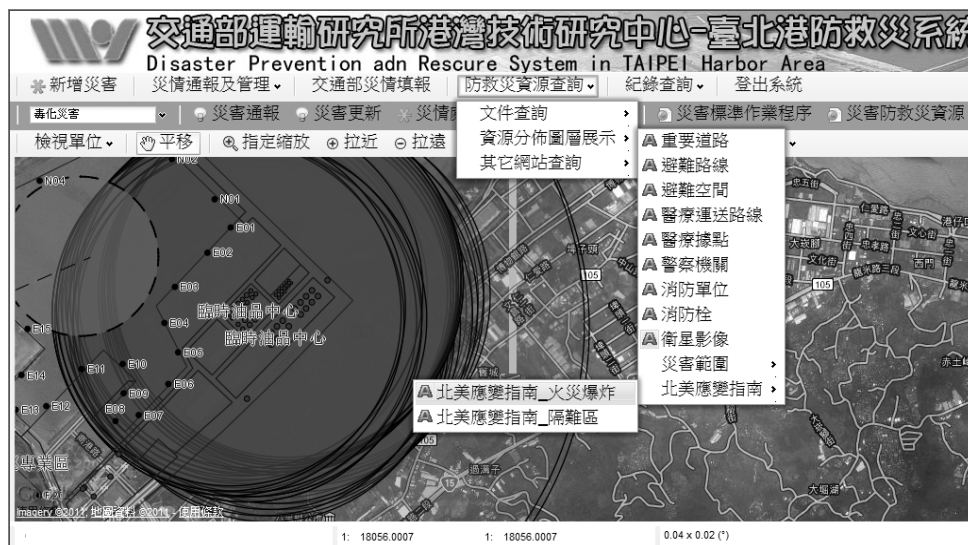


圖 14.10 火災爆炸模擬空間資訊圖層展示

此類災況模擬皆以固定地點做基準，無法針對海上活動的船隻，相關參數、化學品資料庫也有所不足。因此，針對演習項目使用由美國環保署（EPA）與海洋大氣署（NOAA）共同開發之 ALOHA（Areal Locations of Hazardous Atmospheres）軟體，進行外洩擴散分析（如圖 14.11）

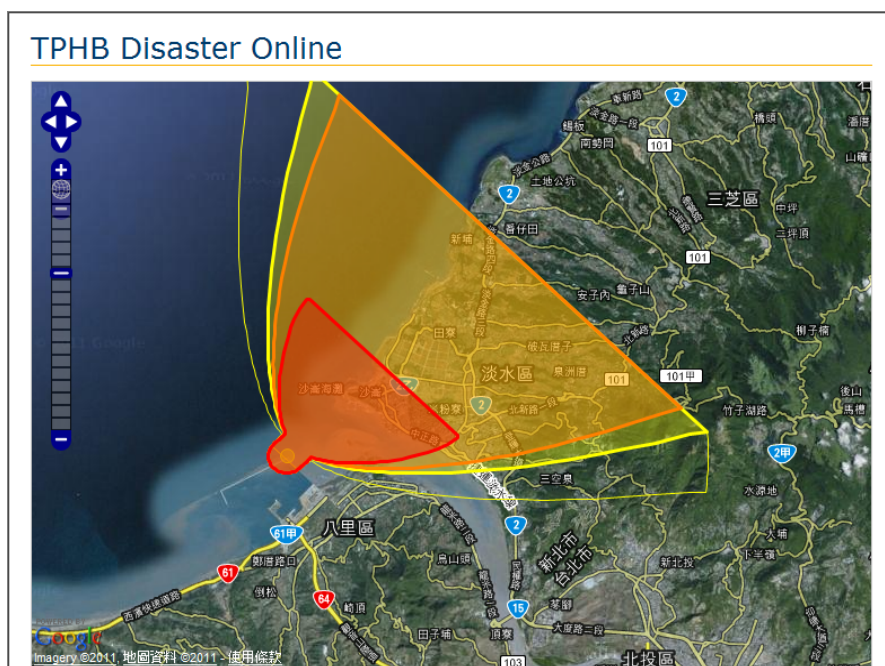


圖 14.11 ALOHA 模擬外洩擴散分析

14.3.3 多媒體災情資訊傳遞

應用原本系統內的災情空間資訊新增、即時多媒體簡訊災況進行災情描述外，增加動態影像即時上傳，並與災害建立關係，使用者除了透過文字描述、空間資訊與圖片等得知災況，另可透過連續的影片動畫更清楚與直接的掌握災情(如圖 14.12)。



圖 14.12 災情影片連結系統畫面

演習中也透過本系統進行災情的通報與傳遞(如圖 14.13))，主要使用簡訊和語音的方式將災情發送至指定接收群組。

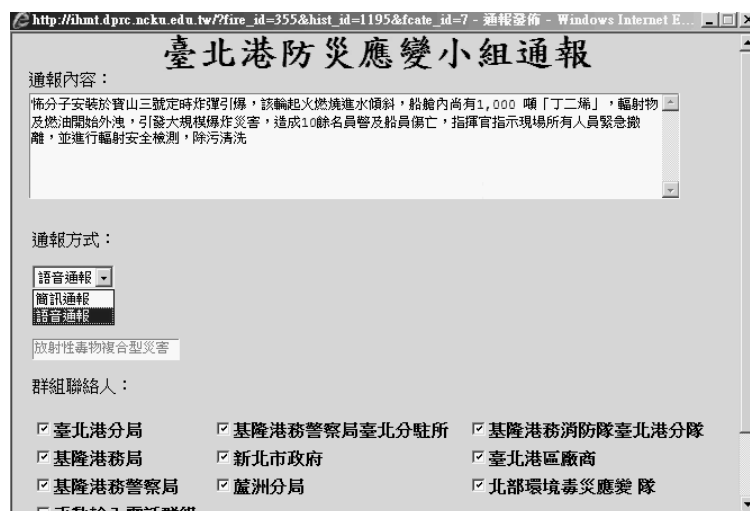


圖 14.13 災情通報系統畫面

14.3.4 港區 CCTV 監控

裝備展示另包含運輸研究所港灣技術研究中心於臺北港分局架設之兩組 CCTV 進行港灣地區監控，臺北港分局本身也有相關 CCTV 監控，其主要用於港區內外通聯狀況之掌控。透過本次演習，將上述各項 CCTV 進行更新，透過系統展示相關空間資訊與即時影像(如圖 14.14)。



圖 14.14 臺北港區 CCTV 系統畫面

目前臺北港分局自行架設共六處 CCTV，港灣技術研究中心架設兩處 CCTV，統計如表 14-2。

表 14-2 臺北港區 CCTV 統計表

地點	網路位置	權責單位	備註
崗哨 1	117.56.56.227	臺北港分局	
崗哨 2	117.56.56.228	臺北港分局	
崗哨 3	117.56.56.229	臺北港分局	
崗哨 5	117.56.56.230	臺北港分局	
消防隊	117.56.56.231	臺北港分局	
行政大樓(旁側)	117.56.56.232	臺北港分局	
行政大樓(頂樓)	163.29.73.72	港研中心	定焦鏡頭
行政大樓(頂樓)	163.29.73.73	港研中心	可調式變焦鏡頭

14.3.5 演習歷程說明

共計參與三次實兵預演與二次裝備展示預演，其演習場地位於臺北港北五、北六碼頭區。6月8日為第一次實兵預演，進行人員編組、演練動線與項目等初步確認(如圖 14.15)，6月14日為第一次裝備展示預演，確認現場各裝備位置與展示內容，6月15為第二次實兵預演(如圖 14.16)，6月22日為第二次裝備展示和第三次實兵預演，確認硬體設備、電力與展示看板(如圖 14.17、圖 14.18)。



圖 14.15 預演現場(6月8日)



圖 14.16 預演現場(6月15日)



圖 14.17 裝備展示現場(6 月 22 日)



圖 14.18 交通部運輸研究所港研中心裝備展示現場(6 月 22 日)

14.4 臺中港海嘯應變演練暨港口保全演習

本次演習僅包含實兵演練，由系統畫面呈現海嘯漫淹模擬空間資訊展示與災情通報傳遞，並由海巡署第三海巡隊提供參演單位名單，即時發送災情通報簡訊與現場人員進行互動，並結合港灣技術研究中心所研究「臺灣沿岸海嘯影響範圍與淹水潛勢分析」之成果。下列就參與演習歷程、系統配合之項目與演習現場狀況分別說明。

14.4.1 臺中港海嘯應變演練暨港口保全演習歷程

於 100 年 3 月份開始接洽臺中港分局，直到 8 月份才確定演習項目與時程，並主動與海巡署第三海巡隊聯繫，討論該演練內容與協助之可能。8 月中訂定港灣技術研究中心為演習參演單位，參演項目包含：

1. 現場即時發佈通報簡訊至各參演人員手機。
2. 港區防救災資訊系統通報畫面。
3. 海嘯災害模擬運用於港區防救災資訊系統。
4. 提供港區救災地理資訊系統說明文件作為演習手冊之內容。

共計二次預演和一次正式演習，相關歷程說明如表 14-3。

表 14-3 海嘯應變演練暨港口保全演練參與進度說明表

拜訪日期	討論事項
3 月 4 日	拜訪臺中港務局，尚未排定今年度演習項目與時程。
8 月 8 日	得知海巡署第三海巡隊舉辦 100 年度海嘯應變演練暨港口保全演習。
8 月 17 日	為達成演練目地，由行政院海岸巡防署海洋巡防總局指導第三海巡隊，結合臺中港務局與台灣電力公司台中發電廠，辦理「100 年度中區海嘯應變演練暨港口保全演習」示範觀摩。 取得演習腳本初稿，並協調本系統於腳本內之角色定位。演習項目包含海嘯災害與港口保全，僅針對海嘯災害部份由系統呈現海嘯漫淹空間資訊，並提供現場即時簡訊災情通報與參與者互動。
8 月 24 日	由交通部運輸研究所港灣技術研究中心與成功大學防災研究中心共同參與本此演練。 第一次實兵預演。
8 月 30 日	原訂正式演出，因南瑪都颱風來襲，各單位執行防災應變勤務而延期。
9 月 1 日	第四次實兵預演。
9 月 2 日	正式演習。

14.4.2 海嘯漫淹模擬

本此演練針對海嘯災害共有三個狀況，分別為海嘯災害防救應變整備及遠地地震海嘯警報應變作為、近海地震海嘯警報應變作為及近海地震海嘯警報應變作為。原本系統在設計上依照防救災標準作業程序，海嘯災害為各類災害項目之一，提供災情通報與狀況更新(如圖 14.19)。

事件名稱：中區海嘯應變演練暨港口保全演習						事件結束歸檔			
2011/9/2 下午 01:05:59 發生災害						災害結束 ☐			
災情描述	災害類別	最新狀況	發生時間	災情影音	通報	狀況	修改	刪除	
預計台中港區外第一波海嘯波抵達時間為14時10分及海嘯波高約4公尺，請民眾提高警覺嚴加防範	海嘯災害	狀況研判	2011/9/2 13:7:10	瀏覽	通報	新增	編輯	刪除	
「海洋號」在進港途中，再次遭大浪襲擊，前尖艙油漆庫房大量進水，船艙油漆庫房大火引發爆炸，情況危急。	海嘯災害		2011/9/2 13:41:14	瀏覽	通報	新增	編輯	刪除	
2011/9/2 下午 12:10:07 發生災害						災害結束 ☐			
災情描述	災害類別	最新狀況	發生時間	災情影音	通報	狀況	修改	刪除	
中央氣象局依據美國太平洋海嘯預報中心(PTWC)通報發布，2011年9月2日12時50分(台灣時間)，在北緯19度08分、東經111度51分，相對位置在海南島東方72浬海底，發生規模9地震	地震災害	狀況研判	2011/9/2 13:4:28	瀏覽	通報	新增	編輯	刪除	
關閉視窗									

圖 14.19 海嘯災害災情管理與更新系統畫面

本次海嘯災害模擬透過數值地形模型之高程資料，參考港灣技術研究中心提供之「臺灣沿岸海嘯影響範圍與淹水潛勢分析」模擬資料，依據腳本內容針對臺中港區淹水範圍與深度進行空間資訊分析(如圖 14.20)

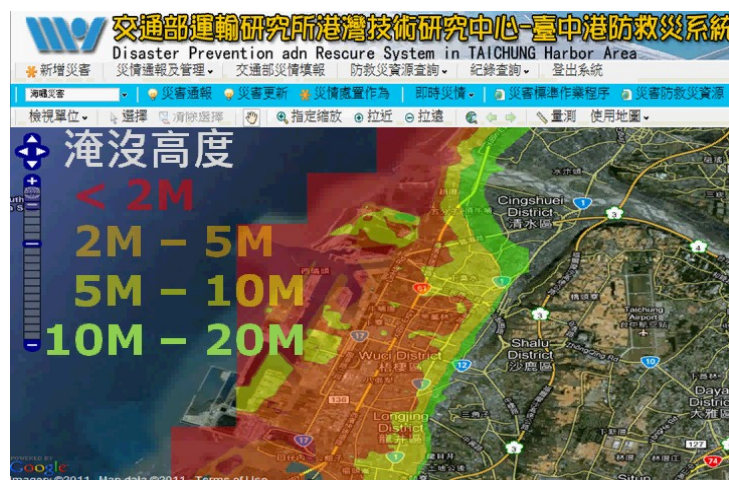


圖 14.20 臺中港區淹水範圍與深度

14.4.3 臺中港務消防隊「救災系統」測試

臺中港務消防隊亦配合此次演練，出動配置隨車影像攝錄裝置之化學消防車參與演練。消防車發動後隨即啟動系統，可透過應變中心內之系統畫面得知消防車之行車軌跡，並即時回傳現場即時畫面(如圖 14.1)。

透過臺中港務消防隊應變中心人員之協助，使用救災系統擷取特定時間之影像，匯出成 AVI 檔案，透過頁面上傳至港區防救災資訊系統(如圖 14.3)。同時，演習現場指揮中心之操作人員可針對上傳的影片與目前發生之災害狀況進行連結(如圖 14.19)，提供除了文字與圖片之外的災情資訊(如圖 14.21)。



圖 14.21 即時影音災情系統畫面

14.4.4 演習歷程說明

本計畫共計參與二次實兵預演及正式演習，其演習場地位於臺中港四十三號碼頭，演習現場會面如圖 14.22、圖 14.23。



圖 14.22 演習現場(觀禮臺區)



圖 14.23 演習現場(陸上實兵演練)

第十五章 結論與建議

15.1 研究目的與問題

臺灣正位於地震發生最頻繁的環太平洋地震帶西側，每年大小地震不斷，而且臺灣重要的商港大都座落於疏鬆軟弱之沖積土層與回填之新生地上，在強烈地震作用下，極可能發生結構物震盪損傷，或因土壤液化引發港灣碼頭向海側位移、傾斜與沉陷等災害；另西南沿海部分地區，因地下水抽取補注失衡，仍有持續下陷現象，此亦影響港區的現有設施及未來發展。故此，對於港灣地區的地震下陷等地質災害，我們不可不審慎防備。

本計畫預期目標如下：1.建立港區碼頭液化土壤-結構互制行為分析方法與驗證資料。2.持續維護重要港區井下地震監測系統。3.持續監測及分析各港區井下地震監測系統及西南重要港灣地區分層下陷資料。4.整合現地監測資料、模型試驗及數值模擬，提升現有港區受震評估技術，減低災害損失。5.補充更新暨有港灣環境基本工程資料庫，增建各輔助港基本資料，提供各港務局查詢使用。6.運用開放式網路地理資訊系統技術更新港灣地區防救災系統之研究，提供港局防救災應用。

在此目標下，本計畫遂於港灣地區進行(1)港區碼頭動態模型試驗及數值模擬研究，(2)港區各類碼頭結構物耐震能力分析，(3)港區地震及地層下陷分層監測研究，(4)港區工程基本資料庫更新建置，(5)港區防救災網路地理資訊系統擴建及整合等研究工作，以提升現有港區受震評估技術，減少地震或下陷災害可能帶來的衝擊，提供港務單位做為規劃設計及防救災決策支援使用。

15.2 結 論

1. 本計畫執行動態板樁式碼頭液化土層模型試驗，係以國家地震工程研究中心租用震動台與層狀剪力盒做為試驗平台，並以自行設計之板樁

模型與回填飽和乾淨砂進行單向水平震動，進行土壤液化動態板樁式碼頭模型試驗，本年度已完成單向度震動試驗，並成功達到土壤液化且板樁碼頭產生約 25cm 水平位移，初步結果顯示實驗程序、試體準備方式、板樁模型及監測系統配置達到原規劃目標。

2. 本計畫板樁式碼頭實體模型之動態數值模擬，係進行對應模型試驗之二維動態有效應力數值模擬，計畫開始前進行一系列不同配置之板樁模型模擬，據以設計板樁模型與相關量測配置，以作為後續由模型試驗結果進行數值分析模型修正，使其改善量化準確度，結果顯示以數值模擬結果配置之實體模型可行，破壞模式相似且具一定準確性。
3. 本計畫在港區碼頭結構物耐震能力分析上，以 921 地震臺中港碼頭災損的案例驗證結果顯示，因 FLAC 可以有效模擬土壤發生液化對碼頭結構物穩定性的影響，故驗證結果尚能符合實際之碼頭災損情形，顯示以 FLAC 應用程式來分析沉箱式碼頭之功能性為可行之方法。
4. 本計畫在港區地震監測研究上，分析得知臺北港震波放大倍率約於 3-5 倍之間，平均約為 4 倍。高雄港震波放大倍率約於 3-7 倍之間，平均約為 4.5 倍。臺中港平均約為 3 倍，故高雄港區淺層地層最為疏鬆軟弱，且與深層地層之軟硬比最大，臺北港次之，臺中港最小。
5. 臺北港地震站分析各震度之最大水平地表加速度轉換成傅氏譜後，初步分析結果，震度 1 至 3 級之第一主頻約介於 0.71~0.86Hz。高雄港地震站震度 1 至 3 級之主頻約介於 0.69~1.02Hz。
6. 高雄港地震站以單站頻譜比法分析 2006 年恆春強震頻譜比與 2005 至 2008 年之弱震平均頻譜比資料，經比對結果，在低頻帶部份 0.12Hz 以下呈現線性反應並無放大現象，0.3Hz~1.3Hz 出現明顯的線性放大反應，但在 8.3Hz~28Hz 之間強震頻譜比小於弱震平均頻譜比值，土壤出現非線性反應，測站土壤雖有非線性放大現象，但高雄港區並無土壤液化災情發生。

7. 本計畫在港區地層下陷分層監測研究上，發現布袋港水位監測站在 -105 m、-143 m 及 -178 m 深度之地下水位已降到地表下約 20 餘公尺，故布袋港附近地區有超抽深層之地下水，致使港區之深層水位下降而引起地層下陷的情形。200m 地層下陷站經量測結果，自 86 年 2 月至 100 年 10 月止，總累積沉陷量約為 56cm，其中百分之 48 以上之沉陷在深度 -140~ -200m 地層發生，屬深層沉陷，近 3 年來年平均沉陷量約為 2.7cm。300m 地層下陷站經量測結果，自 89 年 10 月至 100 年 10 月止，共 11 年總累積沉陷量約為 69cm，整體而言，布袋港區近 3 年來地層下陷有趨緩現象。
8. 本計畫在港灣工程基本資料庫的建置上，於年度內更新增補的資料項目及系統功能，計有四大國際港現況配置資料，四大國際港未來規劃資料，蘇澳港區鑽孔地質柱狀圖展繪功能，蘇澳港區液化分析柱狀圖展繪功能，蘇澳港全港區液化分析圖自動出圖展繪功能。另在各個貨櫃碼頭的年營運量資料上，新增高雄、臺中及基隆等三個國際大港 2010 年的運量統計，在海氣象觀測資料上也增建 2010 年各港風潮浪流及颱風等資料。
9. 本計畫運用桌上型地理資訊系統 MapInfo 所建置的港灣工程基本資料庫，累進資料計已達：高雄港 1,097 筆資料、臺中港 272 筆資料、基隆港 464 筆資料、花蓮港 110 筆資料、臺北港 118 筆資料、蘇澳港 172 筆資料、安平港 316 筆資料、布袋港 78 筆資料、馬公港 117 筆資料，而不分港域所建置的海氣象現地調查圖表資料計有：風力 16,297 筆資料、潮位 25,212 筆資料、波浪 14,495 筆資料、海流 11,828 筆資料、颱風 2,191 筆資料。
10. 地理資訊系統，除了整理典藏珍貴資料，及快速便捷的查詢展示外，也應對所典藏的資料提供分析應用的功能。本研究利用軟體工具來設計分析模組，由資料庫內擷取地質資料，展繪各鑽孔及全區域的可能液化程度，可提供工程人員設計參考，預做災害防治處理。

- 11.本計畫在港區防救災相關資料建置上，年度內完成安平港港區地理資訊基本圖資共計 5,200 筆空間資料之建置，圖層包括碼頭、迴船池、儲槽、港區範圍、港區配置、倉庫區塊、消防栓、避難處所等圖層與 8 公尺解析度之福衛二號影像(2011 年)。
- 12.在安平港港區各類災害緊急應變及監控彙報之策略與流程作業上，本計畫主要參考「交通部基高雄務局安平港分局災害防救業務計畫」進行安平港各類災害防救策略之研擬，內容包括法源依據、災害事件標準作業程序、誘發之各類災害標準作業程序、應變組織分工表、防救災資源資料等內容。
- 13.安平港防救災資料庫系統主要供港務局人員於災害防救業務上之災情登錄、查詢、傳遞與通報使用，系統功能規劃二個部份，分別為「災中應變流程」和「輔助功能」。災中應變流程為執行災害應變之功能流程，依據功能之重要性進行配置，包括「新增災害」、「災情通報」、「災情更新」與「新聞稿列印」。輔助功能為應變作業中可供資料查詢參考之功能，包括「防救災資源查詢」、「紀錄查詢」與「地圖顯示」。
- 14.在港區防救災既有系統整合應用與演練測試上，本計畫已於 100 年 6 月 29 日完成臺北港演練，並於 100 年 9 月 2 日臺中港演練，經演練測試結果驗證本系統可滿足災中應變之災情傳遞作業，透過與臺中港務消防隊之系統介接與整合，可將消防隊之車載即時影像資料傳送至本系統中，結合災害位置與各類災情資訊隨時間變化的狀況，以 Google Earth KML 格式進行紀錄，並提供使用者下載與展現 4 度空間災情演變情形。
- 15.在港灣地區防救災體系建置研究方面，本研究主要目的為透過港灣地區防救災資料庫之建置，結合地理資訊系統(GIS)開發，與標準作業程序之擬定等相關作業事項，提供各港務局防救災工作相關業務單位人員，執行港區災害防救規劃與管理之輔助系統使用。

15.3 建議

1. 本計畫板樁式碼頭實體模型之動態數值模擬，其數值分析所用之土壤參數均採用文獻建議之數值，建議後續計畫宜編列相關室內動態試驗，以求取較正確之參數。
2. 本計畫板樁式碼頭實體模型之動態數值模擬，其數值分析所用之 Finn model，係將塑性應變與孔隙水壓分開考慮，無法完全與液化模型試驗結果整合，建議後續研究應以將塑性應變與孔隙水壓合併考慮之土壤模型(如 UBCSAND model)來進行，並執行參數驗證程序，以便更適切模擬實體模型之行為。
3. 本計畫在港區碼頭結構物耐震能力分析上，發現重力式碼頭背填土壤若可能發生土壤液化而評估時未考慮，會嚴重低估結構損壞程度，建議未來重力式碼頭之功能性設計或評估應將土壤液化因素納入考量。
4. 港灣地層下陷監測及港區井下地震監測等研究，為長期性的監測工作，其設施特點為在地表及不同土層中置放監測儀器，如此不只可長期觀察其總量變化，更可獲知不同土層的反應數據，在港區規劃、防災處置及學術研究上，可提供長期的環境數據，值得持續研究。
5. 本研究承繼本所港研中心地理資訊系統的建置業務，繼續擴建臺灣各國際商港及其輔助港、國內商港等港區之工程基本資料庫。這些擴建工作乃是由不同研究群組彙整資料，而以資料預備較完整的港口開始建置。目前地質調查資料已完成基隆、臺北、臺中、高雄、安平、花蓮、蘇澳、布袋、馬公等港之建置，海氣象調查資料已完成基隆、臺北、臺中、高雄、安平、花蓮、蘇澳、布袋等港之建置，腐蝕調查資料已完成基隆、臺北、臺中、高雄、安平、花蓮、蘇澳、馬公等港之建置，貨櫃運量資料已新增上年度基隆、臺中、高雄三港之數據，而查詢系統的規劃及程式模組的設計乃是依據這些資料來撰寫及除錯。目前資料項的查詢架構已完成設計，其餘各港之相關資料將分年繼續彙整建置。

6. 港區資料涵蓋項目廣泛，不僅碼頭、地質、風潮波流等特性資料值得加以建置典藏，其他有關港區的土地利用、人文景觀、社經條件資料之建置分析，都具有參考利用的價值，這些尚待後續計畫繼續努力。
7. 本研究在查詢分析系統上所撰寫的土壤液化分析模組，計有美國、日本及本國等方法，其中本國賴聖耀之方法為目前各項液化潛能評估法中最具有嚴謹統計推算之模式，值得推薦引用。
8. 施做全區域的液化危險度分析時，在安全係數的評估方法上，Iwasaki 等人所採用的方法，只對深度做累加計算，若遇到深度不足 20m 的鑽孔，求算出來的該孔液化潛能指數會偏小，即會使液化的可能性偏低。而在機率分析的評估方法上，賴聖耀所提的方法，有考慮深度的影響而除上深度的累加值，這會減少鑽孔深度不足導致液化潛能指數偏小的影響，此結果也較符合現狀。然而，對於欲作分析的鑽孔，仍建議在規劃及執行現地試驗時，鑽探深度以超過地下 20m 為宜。
9. 在港區防救災系統推廣建議方面，本計畫已完成安平港防救災資料庫系統，並更新高雄港、臺中港、基隆港、臺北港與蘇澳港救災資料庫系統之資料與系統功能。此一整合性系統已經臺北港金華演習與臺中港海嘯應變演練暨港口保全演習之測試與驗證，因此可滿足災中之多面向災情資訊（文字、照片、影音、時空災情變化）之多元傳遞（手機簡訊、多媒體簡訊、網頁）工作。同時本系統採用中華電信之雲端主機，可提升連線速率，並可降低系統之維護成本，因此建議後續計畫可加強本計畫之成果宣導與配合演練工作，以提升各港埠之使用意願，以擴大計畫之成果效益。
10. 查詢系統及資料庫之建檔工作為一永久性的計畫，須不斷的補充更新，使各港區資料庫更趨完備。

15.4 研究成果之效益：

1. 學術效益，發表國際、國內研討會論文 2 篇：

(1)2011 年臺灣地理資訊學會年會暨學術研討會，發表論文「整合雲端與行動裝置之災情傳遞應用初步研究」。

(2)第 33 屆海洋工程研討會暨國科會成果發表會，發表論文「碼頭結構耐震性能設計法之性能目標研究」。

- ### 2. 社會環境安全影響：
- 本計畫建立港灣地區防救災體系地理資訊系統，目前已建置四大港區資料系統，最終之研究成果應可提供作為港區防救災之災前預防、災時應變及災後重建計畫之參考，以提升我國之整體防災能力，有助於環境之安全與資源之永續利用。
- ### 3. 資料庫建置效益：
- 建置港灣工程基本資料庫及建立港區防救災體系之相關資料庫，可作為港灣地區之地震災前預防、災時應變計畫與決策之參考依據。

15.5 提供政府單位應用情形：

- ### 1. 本計畫利用地理資訊系統所開發之「港灣工程基本資料查詢展示系統」，已推廣至高雄、基隆等港務局使用。
- ### 2. 所開發安平港之港區防救災系統，高雄港務局正規劃納入港務組港區防災作業中。
- ### 3. 所建置資料庫含各港圖文屬性資料，隨時可提供本所及港務單位研究分析、開發規劃之需用。

參考文獻

1. 張文忠、林炳森、黃安斌(民國 99 年)，”港灣現地碼頭結構與土壤動態互制監測之研究(2/2)” ，交通部運輸研究所。
2. 賴瑞應、賴聖耀、謝明志、柯正龍、曾文傑(2008)，” 液化對港灣構造物穩定性之影響研究” ，交通部運輸研究所。
3. 翁作新、陳家漢、程漢瑋、吳繼偉(2006)，”大型震動台剪力盒土壤液化試驗(III)-飽和越南砂試體受振沉陷之探討”，國家地震工程研究中心 ，NCREE-06-019.
4. 國家地震工程研究中心 (2000)，”921 集集大地震大地工程災害調查報告”。
5. 賴聖耀、李豐博、蘇吉立、陳志芳(2002)，”港灣地區地震監測與土壤液化潛能評估之研究”，交通部運輸研究所。
6. 港灣技術研究中心(1999)，”臺中港 1 至 4A 碼頭 921 地震液化災損出步調查研究”，專刊 172。
7. 陳正興等 (2004) “土壤液化對交通結構物之影響及液化潛能評估方法與災害分析模式之研究（1/2）”，交通部運輸研究所。
8. 交通部運輸研究所(2005)，”港灣構造物設計基準修訂”。
9. 何幸娟、張文忠、陳志芳、林炳森(2009)，”現地棧橋式碼頭動態液化模型試驗之發展”，第 13 屆大地工程研討會。
10. 港灣研究中心(1999)，”臺中港 1~4A 碼頭 921 地震液化災損初步調查研究”，港灣研究中心專刊 172 號。
11. 臺中港務局(2000)，”九二一地震臺中港北碼頭區港埠設施災損原因研究分析報告書(修訂本)”，宇泰工程顧問有限公司。
12. 賴瑞應、曾文傑、張道光、薛強、張景鐘、許文豪(2005)，”港灣構造物功能性設計法之研究(3/3)” ，交通部運輸研究所。

- 13.賴聖耀(2005),”,以邏輯迴歸法建立 CPT 數據之土壤分類及液化評估模式”,中國土木水利工程學刊,第十七卷,第二期,pp.321-333。
- 14.賴聖耀(2006),”以極限狀態分析法建立標準貫入試驗之液化分析模式”,中國土木水利工程學刊,第十八卷,第一期。
- 15.賴聖耀、謝明志 (2000)「港灣地區土壤液化與震陷潛能評估」,港灣工程耐震安全評估與災害防治研討會。
- 16.賴聖耀(2002),”以 921 地震液化案例之 SPT—N 值建立土壤液化潛能判別模式”,液化潛能評估方法及潛能圖之製作研討會。
- 17.賴聖耀、謝明志(2002),”以邏輯迴歸法建立 CPT 試驗評估液化機率之本土化模式”,24 屆海洋工程研討會,PP.653-657。
- 18.謝明志(2009),”GIS 在臺北港區土壤液化分析及震災速報系統之開發應用”,2009 台灣地理資訊學會年會暨學術研討會。
- 19.紀雲曜、謝明志、曾文傑、黃敏郎、葉永信、李明浩 (2008),「運用地理資訊系統技術建立港灣地區防救災體系之研究」,2008 臺灣地理資訊系統年會暨空間資訊基礎建設國際研討會。
- 20.黃敏郎、葉永信、謝明志、曾文傑、林文釵、紀雲曜 (2009),「運用多媒體簡訊服務與地理資訊系統技術提升港灣地區災情通報之精度研究」,2009 臺灣地理資訊系統年會暨學術研討會。
- 21.黃敏郎、葉永信、謝明志、曾文傑、林文釵、紀雲曜 (2010),「開放式地理資訊系統於港灣地區多方位災情通報之研發」,2010 地理資訊系統國際研討會暨台灣地理資訊學會年會、兩岸四地 GIS 與應用遙感研討會。
- 22.黃敏郎、曾文傑 林文釵、謝明志 紀雲曜(2010),「港灣地區災情通報之精度研究」,港灣報導 87 期。
- 23.葉永信、黃敏郎、謝明志、曾文傑、林文釵、紀雲曜 (2009),「使用開放源碼地理資訊系統取代商業軟體之研究以港灣地區防救災系統為例」,2009 臺灣地理資訊系統年會暨學術研討會。

- 24.賴瑞應、賴聖耀 (2004),「地震引致版樁式碼頭之穩定性分析」,交通部運輸研究所,民國 93 年 4 月。
- 25.賴瑞應等 (2005),「港灣構造物功能性設計法之研究 (3/3)」,交通部運輸研究所,民國 94 年 4 月。
- 26.謝明志、單誠基、賴瑞應、陳志芳、林雅雯、曾文傑 (2008),「GIS 在安平港區土壤液化分析及震災速報系統之開發應用」,第 30 屆海洋工程研討會,769 頁-773 頁。
- 27.謝明志、單誠基、賴瑞應、陳志芳、林雅雯、曾文傑 (2008),「港區工程基本資料查詢展示系統」,第 30 屆海洋工程研討會專題討論及海洋科技展示論文專刊。
- 28.謝明志、曾文傑、黃敏郎、葉永信 (2008),「運用地理資訊系統技術建立港灣地區防救災體系之研究」,第 30 屆海洋工程研討會專題討論及海洋科技展示論文專刊。
- 29.謝明志、陳志芳、單誠基、賴瑞應、林雅雯、曾文傑 (2008),「GIS 在高雄港區土壤液化分析及震災速報系統之開發應用」,2008 臺灣地理資訊系統年會暨空間資訊基礎建設國際研討會。
- 30.謝明志、陳志芳、單誠基、賴瑞應、林雅雯、曾文傑 (2009),「GIS 在臺北港區土壤液化分析及震災速報系統之開發應用」,2009 臺灣地理資訊系統年會暨學術研討會。
- 31.Boulanger, R.W., Curras, C. J., Kutter, B.L., Wilson, D.W., and Abghari, A. (1999), "Seismic Soil-Pile-Structure Interaction Experiments and Analyses," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 9. pp.750-759.
- 32.Chang, W. J., Ueng, T. Z., Chan, C. H., and Yang, C. W. (2010), "Embedded Sensor for Measurements of Coupled Responses of Soil in Shaking Table Test", *Soils and Foundations*, Vol. 50/2, pp. 325-334.
- 33.Chang, W. J., Chen, J.F., Ho, H.C., and Chiu, Y. F. (2010), "In Situ Dynamic Model Test for Pile-supported Wharf in Liquefied Sand ", *ASTM Geotechnical Testing Journal*, Vol. 33/3. (DOI:

10.1520/GTJ102425).

34. Dafalias, Y.F. and Manzari, M.T.M. (2004), "Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 130, No. 6. pp.622-634.
35. Finn, W.D.L. and Fujita, N. (2002), "Piles in liquefiable soils: seismic analysis and design issues," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22/9, pp 731-742.
36. Hwang, J.H., Yang, C.W. (2001), "Verification of critical cyclic strength curve by Taiwan Chi-Chi earthquake data " *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.21, pp.237-257.
37. Ichii, K. (2002), "A Seismic risk Assessment Procedure for Gravity Type Quay Walls", *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, Vol. 19, No.2, 131s-140s.
38. Ishihara, K., and Yoshimine, M. (1991), Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and foundations*, Vol.32, No.1, pp.173-188.
39. Ishihara, K., Yasuda, S., and Nagase, H. (1996), Soil characteristics and ground damage, *Special Issue of Soils and Foundations*, pp.109-118
40. Iwasaki, T., Arakawa, T. and Tokida, K. (1982) , "Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction During Earthquakes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering Conference Southampton*, pp.925-939.
41. Iai, S. and Kameoka, T. (1993), "Finite Element Analysis of Earthquake Induced Damage to Anchored Sheet Pile Quay Wall," *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 1. pp. 71-91.
42. Iai, S., Ichii, K., Liu, H., and Morita, T. (1998), "Effective Stress Analyses of Port Structures," *Soils and Foundations*, special issues, pp.97-114.
43. Lin, P. S., Lai, S. Y., Lin, S. Y., and Hsieh, C. C. (2000), "Liquefaction potential assessment on Chi-Chi earthquake in Nantou, Taiwan." *Proceedings of International Workshop on Annual Commemoration of*

Chi-Chi Earthquake September 18-20, Taipei. Vol. III, 83-94.

44. Klar, A. and Frydman, S. (2002), "Three-Dimensional Analysis of Lateral Pile Response using Two-Dimensional Explicit Numerical Scheme," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 9. pp.775-784.
45. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R. L. (1969), "Finite dynamic model for infinite media," J. Eng. Mech. Div., 95(EM4), pp. 859–877.
46. Yang, Z., Elgamal, A., and Parra, E., (2003). "A Computational Model for Liquefaction and Associated Shear Deformation," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 12.
47. Youd, T. L. and Idriss, I. M. (1997), "Proceeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils." State University of New York at Buffalo.
48. Zienkiewicz, O. C., Chan, A. H. C., Pastor M., Paul, D. K., and Shiomi T. (1990), "Static and dynamic behaviour of geomaterials – a rational approach to quantitative solutions, part-1 fully saturated problems," Proc. Royal Society of London, A429, pp. 285-309.